

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGÍA



**Composición y estructura de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Coatepeque,
Santa Ana, El Salvador.**

PRESENTADO POR:

JENIFFER MARISOL GUERRA ALVARENGA

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADA EN BIOLOGÍA

DOCENTE ASESORA

MSTRA. ÁNGELA GUDELIA PORTILLO DE PÉREZ

ASESORA EXTERNA

M.SC. CESIAH REBECA QUINTANILLA GARCÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO, 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGÍA



**Composición y estructura de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Coatepeque,
Santa Ana, El Salvador.**

PRESENTADO POR:

JENIFFER MARISOL GUERRA ALVARENGA

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADA EN BIOLOGÍA

DOCENTE ASESORA
MSTRA. ÁNGELA GUEDELIA PORTILLO DE PÉREZ



ASESORA EXTERNA

M.SC. CESIAH REBECA QUINTANILLA GARCÍA



CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO, 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE BIOLOGÍA

**Composición y estructura de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Coatepeque,
Santa Ana, El Salvador.**

PRESENTADO POR:

JENIFFER MARISOL GUERRA ALVARENGA

PARA OPTAR AL GRADO DE:

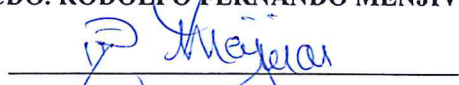
LICENCIADA EN BIOLOGÍA

TRIBUNAL EVALUADOR

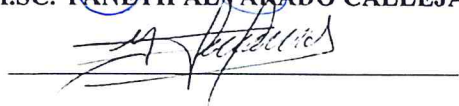
MSTRA. ANGELA GUEDELIA PORTILLO DE PÉREZ



LCDO. RODOLFO FERNANDO MENJÍVAR



M.SC. YANETH ALVARADO CALLEJAS



CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO, 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.SC JUAN ROSA QUINTANILLA

VICERRECTOR ACADÉMICO:

DRA. EVELYN BEATRIZ FARFÁN

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA

FISCAL GENERAL:

LIC. CARLOS AMÍLCAR SERRANO RIVERA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

DECANO:

Dr. LUIS GILBERTO PARADA GÓMEZ

VICEDECANO:

Dr. JOSÉ NERYS FUNES TORRES

SECRETARIA:

MSTRA. ÁNGELA GUDELIA PORTILLO DE PÉREZ

DIRECTORA ESCUELA DE BIOLOGÍA

LICDA. MILAGRO ELISABETH SALINAS DELGADO

DEDICATORIA

A mi abuela Catalina, que con mucho amor inició la historia de mi familia, a mis amigos de quienes he recibido lo mejor. Quien desde la muerte cambia un destino, fija una sonrisa en la memoria. Es perdurable tu amor y la libertad que yo viví contigo y es porque estoy hecha de pedacitos de ti.

AGRADECIMIENTOS

Laboratorio de Toxinas Marinas Universidad de El Salvador (LABTOX-UES).

Facultad de Ciencias Naturales y Matemática Universidad de El Salvador.

Escuela de Biología.

Fundación Coatepeque.

Licenciada Ángela Gudelia Portillo de Pérez.

M.Sc. Cesiah Rebeca Quintanilla.

A las familias Lemus, López y Aguilar.

A mis amigos que siempre me han apoyado y amado.

A mi familia en particular, a mis padres, mis tías y tíos.

Cada cosa que sucede en nuestra vida está acompañada de una multitud de personas bondadosas que nos cubren con sus alas y nos animan a seguir adelante espero mi vida honre su presencia y su favor.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	11
II. OBJETIVOS	12
III. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	12
3.1 ANTECEDENTES	12
3.2 GENERALIDADES DEL FITOPLANCTON.....	13
3.3 FITOPLANCTON DE AGUA CONTINENTAL.....	15
3.4. PRINCIPALES GRUPOS TAXONÓMICOS DE FITOPLANCTON DE AGUA CONTINENTAL.....	16
3.4.1. Phylum Cianobacteria	16
3.4.2 Phylum Chlorophyta.....	17
3.4.3 Phylum Cryptophyta.....	18
3.4.4 Phylum Euglenozoa.....	18
3.4.5 Phylum Ochrophyta.....	18
3.4.6 Phylum Bacillariophyta	18
3.4.7 Phylum Charophyta	19
3.5 FACTORES FÍSICO-QUÍMICOS QUE INCIDEN EN EL DESARROLLO DEL FITOPLANCTON CONTINENTAL.....	19
3.5.1 Radiación solar	19
3.5.2 Temperatura.....	20
3.5.3 Potencial de hidrógeno pH	22
3.5.4 Turbidez y color.....	23
3.5.5. Oxígeno disuelto.....	23
3.5.6 Nutrientes	24
3.6 IMPACTO DE LAS PROLIFERACIONES ALGALES EN EL AGUA CONTINENTAL.....	25
3.7 ANÁLISIS DE FITOPLANCTON CONTINENTAL A PARTIR DE GRUPOS MORFOFUNCIONALES.....	26
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30

4.1 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
4.1.1 Hidrografía	30
4.1.2 Topografía y tipo de suelo	30
4.1.3 Clima	31
4.1.4 Zona de vida	31
4.1.5 Vegetación y Fauna	31
4.2 DISEÑO DE MUESTREO	32
4.2.1 Medición de variables físico-químicas	34
4.2.2 Toma de muestras de fitoplancton.....	34
4.3 FASE DE LABORATORIO.....	35
4.3.1 Análisis cualitativo de las muestras.....	35
4.3.2 Análisis cuantitativo de las muestras.....	36
4.4 ANÁLISIS DE DATOS	38
4.4.1. Análisis de riqueza.....	38
4.4.2 Análisis de diversidad.....	40
4.4.3 Análisis de la estructura.....	41
4.5 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE LA ESTRUCTURA CON LAS VARIABLES FÍSICO- QUÍMICAS.....	43
V. RESULTADOS	44
5.1 COMPOSICIÓN DE ESPECIES DE FITOPLANCTON	44
5.1.1 Bacillariophyta	44
5.1.2 Cianobacterias	51
5.1.3 Chlorophyta	55
5.1.4 Charophyta	58
5.1.5 Miozoa.....	58
5.1.6 Euglenozoa	59
5.2 ESTIMACIÓN DE RIQUEZA.....	59
5.3 DIVERSIDAD DE ESPECIES DE LA COMUNIDAD DE FITOPLANCTON	60
5.3.1 Índice de diversidad de Shannon-Wiener e índice de dominancia de Simpson..	60
5.4 ABUNDANCIA DE LA COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA.....	62
5.5 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA	62

5.5.1 Variabilidad espacial de la composición y abundancia.....	62
5.5.2 Variabilidad temporal de la composición y abundancia.....	69
5.5.3 Variación temporal de grupos morfo-funcionales.....	73
5.6 VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS DEL LAGO DE COATEPEQUE.....	80
5.6.1 Temperatura.....	80
5.6.2 Potencial de hidrógeno (pH).....	83
5.6.3 Sólidos disueltos totales (ppm).....	85
5.6.4 Transparencia.....	87
6.7 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y LA ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA.....	88
VI. DISCUSIÓN.....	89
VII. CONCLUSIONES	96
VIII. RECOMENDACIONES	98
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
X. ANEXO	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Puntos de muestreo seleccionado en el Lago de Coatepeque para la medición de parámetros físico-químicos y toma de muestras cualitativas y cuantitativas de fitoplancton.....	32
Tabla 2. Lista de especies de la división Bacillariophyta según clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).....	45
Tabla 3. Lista de especies de cianobacterias según clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021)	52
Tabla 4. Lista de especies de Chlorophyta encontradas clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).....	56
Tabla 5. Lista de especies de Chlorophyta clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).....	58
Tabla 6. Lista de especies del Phylum Miozoa clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).....	58
Tabla 7. Lista de especies de Euglenozoa clasificación propuesta por Guiry, M.D. & Guiry, 2021	59
Tabla 8. Similaridad de ANOSIM para comparar la comunidad de fitoplancton en los tres niveles de profundidad en el Lago de Coatepeque de julio 2017 a junio 2018. R: estadístico, Nivel de sig. (%): Nivel de significancia en porcentaje	65
Tabla 9. Similaridad de ANOSIM para comparar la comunidad de fitoplancton en los puntos de muestreo del Lago de Coatepeque de julio 2017 a junio 2018. R: estadístico, Nivel de sig. (%): Nivel de significancia en porcentaje.....	67
Tabla 10. Especies con mayor contribución a la similaridad en la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia promedio se expresa en raíz cuarta (Av. Abund: Abundancia promedio, Av. Sim: Promedio de similaridad, Sim/SD: Similitud/ desviación estándar, % Contrib: Porcentaje de contribución, % Acum: Porcentaje acumulado)	72

Tabla 11. Especies con mayor contribución a la similaridad en la época seca de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia promedio se expresa en raíz cuarta. (Av. Abund: Abundancia promedio, Av. Sim: Promedio de similaridad, Sim/SD: Similitud/SD, % Contrib: Porcentaje de contribución, % Acum: Porcentaje acumulado)..... 72

Tabla 12. Especies con mayor contribución a la disimilaridad entre la época seca y la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER, la abundancia se expresa en raíz cuarta. (Av. Abund: Abundancia promedio, Av. Sim: Promedio de similaridad, Sim/SD: Similitud/SD, % Contrib: Porcentaje de contribución, % Acum: Porcentaje acumulado)..... 73

Tabla 13. Lista de especies encontradas durante el periodo de muestreo con su clasificación de Grupo Morfo-Funcional (GMF) según Kruk et al (2010) para el Lago de Coatepeque..... 74

Tabla 14. Grupos Morfo-funcionales con mayor contribución a la similaridad entre la época seca de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia se expresa en la raíz cuarta (Av. Abund: Abundancia promedio, Av. Sim: Promedio de similaridad, Sim/SD: Similitud/SD, % Contrib: Porcentaje de contribución, % Acum: Porcentaje acumulado)..... 79

Tabla 15. Grupos Morfo-funcionales con mayor contribución a la similaridad entre la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia se expresa en raíz cuarta (Av. Abund: Abundancia promedio, Av. Sim: Promedio de similaridad, Sim/SD: Similitud/SD, % Contrib: Porcentaje de contribución, % Acum: Porcentaje acumulado)..... 80

Tabla 16. Grupos Morfo-funcionales con mayor contribución a la disimilaridad entre la época seca y la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia se expresa en la raíz cuarta (Av. Abund: Abundancia promedio, Av. Sim: Promedio de similaridad, Sim/SD: Similitud/SD, % Contrib: Porcentaje de contribución, % Acum: Porcentaje acumulado) 80

Tabla 17. Matriz de variables utilizadas y resultados de la selección de variables ambientales de la prueba BIO-ENV para explicar la abundancia de la comunidad fitoplanctónica en el ambiente del Lago de Coatepeque entre julio 2017 y junio 2018. (Temp. [°C]: Temperatura en Centígrados (1), pH: Potencial de Hidrogeno (2), TDS. (ppm) Sólidos disueltos totales (ppm) (3), y Secchi (cm): Transparencia (4))..... 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los siete grupos funcionales basados en la morfología (MBFG), incluyendo una breve descripción de su morfología. S superficie, V volumen. Fuente. Kruk <i>et al.</i> (2010).....	29
Figura 2. Mapa de ubicación del Lago de Coatepeque con los sitios de muestreo. Punto 1. Bajadero la Bendición, Punto 2. Club de El Salvador, Punto 3. Restauraste Cardedeu. Punto 4. Castillo del Rey, Punto 5. Centro del Lago Punto 6. Los Anteojos, Punto 7. La Peñona, Punto 8. Isla Teopán	33
Figura 3. Esquema de muestreo estratificado en el lago Coatepeque. Muestra superficial (0M), muestra profundidad intermedia (10M) y muestras de profundidad de compensación (20M)	34
Figura 4. Imágenes de muestreo de la comunidad fitoplanctónica a) toma de muestra cualitativa, b y c). Toma de muestra cuantitativa en El Lago de Coatepeque	35
Figura 5. Imágenes de identificación y cuantificación de fitoplancton en El Lago de Coatepeque a). Uso de cámara de Sedgewick-Rafter para análisis cualitativo. b). Muestras para la sedimentación método de Utermöhl. c). Conteo celular al microscopio invertido...	36
Figura 6. Recuento celular por transectos en cámara completa de Utermöhl. Fuente: Reguera <i>et al.</i> (2011)	37
Figura 7. Clave para la clasificación de los grupos morfo-funcionales, traducido de Kruk <i>et al.</i> (2010)	43
Figura 8. Porcentaje de especies por División encontradas en el Lago de Coatepeque	44
Figura 9. Especies de la División Bacillariophyta a), <i>Epithemia sp.</i> , b), <i>Epithemia cf. turgida</i> , c), <i>Cocconeis cf. lineata</i> , d), <i>Cocconeis cf. euglypta</i> , e), <i>Cocconeis sp.</i> , f), <i>Sellaphora cf. Saugerresi</i> , g), <i>Achnantheidium sp</i> , h), <i>Fragilaria sp.4.</i> , i), <i>Rhopalodia sp</i>	48
Figura 10. Especies del phylum Bacillariophyta encontradas en Lago de Coatepeque julio 2017- julio 2018. a), <i>Nitzschia sp. 1</i> , b), <i>Nitzschia sp. 2.</i> , c), <i>Nitzschia sp. 3.</i> , d), <i>Achnanthes sp.</i> , e), Bacillariophyta pennada sp.6., f), <i>Cyclotella cf. atomus</i> , g), <i>Cyclotella cf. meneghiniana</i> , h e i), <i>Cyclotella cf. quillensis</i>	49

Figura 11. Especies de la División Bacillariophyta a), *Cyclotella sp.*, b y c), *Terpsinoë cf. muninensis*, d), *Terpsinoë sp.1.*, e), *Terpsinoë sp.2.*, f), *Cymbella sp.*, g), *Surirella sp.*, h e i), Bacillariophyta pennada sp.5..... 50

Figura 12. Especies de la División Bacillariophyta a), *Gyrosigma sp 1.*, b), *Fragilaria sp 4.*, c), *Gomphonema sp.*, d), Bacillariophyta pennada sp. 2., e), Bacillariophyta pennada sp. 4., f), *Fragilaria sp. 2.*, g), *Fragilaria sp. 3.*, h), Bacillariophyta pennada sp. 2., i), *Thalassiosira sp.*, j), *Gyrosigma sp. 2.*, k), *Synedra sp.*, l), *Aulacoseira sp.*, m), *Eunotia sp.*, n), *Navicula sp.*..... 51

Figura 13. Especies de la División Cyanophyta. a), *Aphanocapsa sp. 1.*, b), *Aphanocapsa sp. 2.*, c), *Aphanocapsa cf. Annulata*, d), *Aphanocapsa cf. delicatissima.*, f), *Gloeocapsa cf. gelatinosa*, f), *Aphanothece sp.*, g), *Gloeocapsa sp.*, h), *Microcystis cf. wesenbergii*, i), *Microcystis cf. aeruginosa*, j), *Microcystis sp.*, k), *Gomphosphaeria sp.*, l), *Chroococcus cf. Turgidus*, m), *Limnoraphis cf. birgei*, n), *Pseudanabaena sp. 1*, ñ), *Pseudanabaena sp. 2*, o), *Pseudanabaena sp. 3*, p), *Oscillatoria cf. boryana* 54

Figura 14. Especies del phylum Cyanophyta encontradas en Lago de Coatepeque julio 2017-junio 2018. a), *Cylindrospermopsis sp.*, b), *Planktothrix sp.*, c), *Komvophoron sp.*, d), *Synechocystis sp.*, e), *Raphidiopsis cf. mediterranea.*, f), *Oscillatoria sp.*, g), *Merismopedia sp.*, h), *Coelomoron sp.*, i), *Cyanophyta sp.*, j), *Eucapsis sp.*, k), *Aphanocapsa cf. Annulata*, l), *Homoeothrix sp.* m), *Synechococcus sp.*, n), *Spirulina sp.*, ñ), *Pseudanabaena sp.3*..... 55

Figura 15. Especies de la División Chlorophyta a), *Coelastrum sp.*, b), *Ankistrodesmus sp.*, c), *Kirchneriella sp.*, d), *Oocystis cf. solitaria*, e), *Gloeocystis sp.* f), *Crucigenia sp.*, g), *Actinastrum sp.*, h), *Stauridium sp.*, i), *Pediastrum sp.*, j), *Eudorina cf. elegans*, k), *Rhizoclonium sp.*, l), *Chlorella sp.*, m), *Oocystis cf. lacustris*, n), *Tetraëdron sp* 57

Figura 16. Especies de la División Charophyta. a) *Spirogyra sp.*, b) *Staurastrum sp* 58

Figura 17. Especies de la División Miozoa a), *Gymnodinium sp*, b), *Heterocapsa sp*, y Euglenozoa c), *Euglena sp* 59

Figura 18. Curva de acumulación de especies y comparación de riqueza estimada para la comunidad de fitoplancton del Lago de Coatepeque a través de tres estimadores no paramétricos Chao 2, Jackknife 1 y Jackknife 2, S obs: Especies observadas..... 60

Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes. de los valores del índice del índice diversidad de Shannon-Wiener (a) e índice de Simpson (b). Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa. El ancho de la caja representa la distancia entre el primer y el tercer cuartil, la línea interior la mediana, la "×" Media aritmética y la barra vertical los valores máximos y mínimos de la varianza. Los puntos por fuera de la caja corresponden a valores atípicos o extremos.....	61
Figura 20. Abundancia celular promedio en 8 puntos de muestreo entre los meses de julio 2017 a junio 2018 a 0 metros de profundidad. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa	63
Figura 21. Abundancia celular promedio en 8 puntos de muestreo entre los meses de julio 2017 a junio 2018 a 10 metros de profundidad. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa	64
Figura 22. Abundancia celular promedio en 8 puntos de muestreo entre los meses de julio 2017 a junio 2018 a 20 metros de profundidad. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa	65
Figura 23. Análisis de ordenamiento NMDS de la comunidad fitoplanctónica por puntos de muestreo a diferentes profundidades en la columna de agua (0, 10 y 20 metros).....	66
Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes sobre la abundancia total de la comunidad fitoplanctónica. El ancho de la caja representa la distancia entre el primer y el tercer cuartil, la línea interior la mediana, la "×" Media aritmética y la barra vertical los valores máximos y mínimos de la varianza con el objetivo de observar mejor los puntos extremos fueron eliminados.....	67
Figura 25. Análisis de ordenamiento NMDS de la comunidad fitoplanctónica en los puntos de muestreo registrados en el Lago de Coatepeque entre julio 2017 a junio 2018	69
Figura 26. Porcentaje de abundancia promedio de las especies de la comunidad de fitoplancton en el Lago de Coatepeque, julio 2017 a junio 2018. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa	70
Figura 27. Análisis de ordenamiento NMDS de la comunidad fitoplanctónica para las épocas de muestreo registradas en el Lago de Coatepeque entre julio 2017 a junio 2018.....	71

Figura 28. Frecuencia de los grupos morfo-funcionales de la comunidad de fitoplancton del Lago de Coatepeque de julio 2017 a junio 2018	76
Figura 29. Porcentaje de abundancia promedio de los grupos morfo-funcionales de la comunidad de fitoplancton por mes de muestreo. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa	78
Figura 30. Análisis de ordenamiento NMDS de Grupos Morfo-funcionales para las épocas de muestreo.....	79
Figura 31. Perfil de la temperatura promedio mensual para las distintas profundidades muestreadas en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018.....	81
Figura 32. Diagrama de cajas y bigotes. de los valores de temperatura en la profundidad de 0 metros (0M), 10 metros (10M) y 20 metros (20M) en los distintos puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018	82
Figura 33. Valores promedio de pH mensuales con respecto a la profundidad superficial (0M), Profundidad intermedia 10 metros (10M) profundidad de 20 metros (20M) muestreadas en El Lago de Coatepeque	83
Figura 34. Variación de los valores de pH en la profundidad de 0 metros (0M), 10 metros (10M) y 20 metros (20M) en los distintos puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018.....	84
Figura 35. Valores promedio de Sólidos disueltos totales (ppm) mensual con respecto a la profundidad superficial (0M), profundidad intermedia de 10 metros (10M) y profundidad de 20 metros (20M) muestreadas en El Lago de Coatepeque durante el periodo de julio 2017 a junio 2018.....	85
Figura 36. Variación de la concentración de Sólidos disueltos totales (ppm) en la profundidad de 0 metros (0M), 10 metros (10M) y 20 metros (20M) en los distintos puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018	86
Figura 37. Valores promedio de transparencia mensuales con respecto a las distintas profundidades muestreadas y b) Variación de transparencia por puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018l periodo de julio 2017 y junio 2018.....	87

RESUMEN

El estudio de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Coatepeque, Santa Ana, El Salvador se analizó a través de 96 muestras cualitativas y 288 muestras cuantitativas, en 8 puntos de muestreo a las profundidades de 0 metros, 10 metros y 20 metros. Entre los meses de julio 2017 a junio 2018 se registraron un total de 99 especies, de las cuales algunas de las más abundantes son *Microcystis cf. aeruginosa*, *Limnoraphis cf. birgei*, *Microcystis cf. wesenbergii*, *Aphanocapsa cf. delicatissima*, *Aphanocapsa cf. annulata*.

De acuerdo a los valores obtenidos a través de la curva de acumulación y estimadores de riqueza se establece que el muestreo es representativo de la diversidad potencial de la comunidad fitoplanctónica del lago. Los valores del índice de diversidad de Shannon-Wiener oscilaron entre 0.1 y 1.9 bits ind⁻¹, con un promedio de 1.2 bits ind⁻¹ durante el periodo de muestreo. El índice de Simpson obtuvo valores entre los 0.04 y 0.8 con un promedio de 0.5.

Las variaciones espaciales de la comunidad fitoplanctónica se exploraron a través del análisis de ordenamiento NMDS observándose que la variabilidad es muy baja lo que no permite establecer un patrón definido, haciendo que toda la comunidad fitoplanctónica se comporte de forma similar, adicionalmente, se efectuaron Análisis de Similitud (ANOSIM) prueba que indicó que no existe diferencias significativas entre los puntos de muestreo y las distintas profundidades. El análisis de similaridad ANOSIM evidenció que existen diferencias significativas entre la época seca y lluviosa y se verificó utilizando el análisis de ordenamiento NMDS. El análisis de la estructura de la comunidad fitoplanctónica se realizó también a partir de la identificación de grupos morfo-funcionales para fitoplancton de agua continental propuesta por Kruk *et al.* (2010).

Con respecto a los parámetros físico-químicos el lago presentó una temperatura promedio que osciló entre 22.5 °C y los 30 °C, un pH promedio 8.5 y porcentaje de sólidos disueltos totales promedio de 962.7 ppm. La relación de los parámetros físico-químicos y la estructura de la comunidad fitoplanctónica presentó una correspondencia baja.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de agua continental son ecosistemas de elevada riqueza biológica, de gran relevancia ecológica y social. En ellos se desarrollan comunidades biológicas, entre las cuales encontramos al fitoplancton, el cual se constituye por comunidades de organismos microscópicos fotosintetizadores que viven en la columna de agua; son de suma importancia en las redes tróficas y de mucha utilidad como indicadores de la calidad de agua (Hernández-Morales *et al.* 2011).

El desarrollo del fitoplancton está sujeto a diversas variables fisicoquímicas que influyen en su composición, distribución y estructura (Fernández 2003, Roldán y Ramírez 2008). De acuerdo a Bort *et al.* (2005) y Hernández-Morales *et al.* (2011), los grupos taxonómicos que forman parte del fitoplancton de agua continental, tomando en cuenta la actual clasificación de Guiry y Guiry (2021) son: Cianobacterias (Cyanophytas), Chlorophytas, Cryptophytas, Euglenozoas, Ochrophytas, Bacillariophytas y Charophytas.

En El Salvador los ecosistemas de agua continental han experimentado cambios drásticos por impactos antropogénicos y naturales. El Lago de Coatepeque es uno de los sistemas lacustres de origen volcánico más sobresalientes del país, ya que en él se despliegan importantes actividades económicas, tales como: la pesca, la agricultura y el turismo. Diversos factores afectan el uso del recurso hídrico, entre ellos las proliferaciones algales nocivas reportadas en los últimos años, que pueden llegar a ser un peligro potencial para la salud del ser humano (MARN 2006, 2012, 2015, 2016).

Una "proliferación Algal Nocivas" (PAN) (en inglés "Harmful Algae Blooms" HAB), es el término más utilizado en el ámbito internacional para describir estos fenómenos naturales en los que se da un incremento acelerado de algunas especies de fitoplancton en el que se hace referencia tanto a las densidades algales tóxicas como a las no tóxicas, ya sea asociadas o no a algún tipo de cambio de color (Anderson *et al.* 2001).

Dentro de los ecosistemas epicontinentales las floraciones de cianobacterias son las más conocidas y estudiadas debido a su relación con los procesos de eutrofización (Smith y Schindler 2009) y su capacidad de producir mecanismos bioactivos (cianotoxinas) y metabolitos secundarios que conforman un grupo de toxinas naturales que se dividen en

péptido cíclicos, alcaloides y lipopolisacáridos (Carvajal 2011). De acuerdo a los efectos perjudiciales al ser humano pueden encontrarse neurotóxicas, hepatotoxinas y dermatotóxicas, por lo que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) todas las floraciones de cianobacterias deben ser consideradas en un principio potencialmente tóxicas y un peligro para la salud humana (Giannuzzi 2009).

Con el fin de contribuir en la toma de decisiones para el monitoreo y mitigación de los impactos de estos fenómenos, este estudio proporciona una base de datos inicial, que permite conocer la composición, diversidad y estructura de la comunidad fitoplanctónica presentes en el lago. Incursionar en el análisis de la composición y estructura de las comunidades fitoplanctónicas a través de la identificación de grupos morfo-funcionales de fitoplancton de agua dulce propuesto por Kruk *et al.* (2010) y proporciona la relación de algunas variables fisicoquímicas con el desarrollo de la comunidad fitoplanctónica.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Describir la composición y estructura de la comunidad fitoplanctónica del lago de Coatepeque.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la composición, riqueza y abundancia de la comunidad fitoplanctónica del lago de Coatepeque.
- Analizar la estructura de la comunidad fitoplanctónica desde la perspectiva de grupos morfo-funcionales.
- Relacionar los parámetros fisicoquímicos con la estructura de la comunidad fitoplanctónica.

III. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

En El Salvador la mayoría de estudios de fitoplancton se han centrado en la zona costera. La primera contribución de información de fitoplancton para el país, corresponde a un inventario de diatomeas en la Bahía de Jiquilisco realizado por Menjívar (1985). En la década siguiente, otros autores realizaron esfuerzos, en el estudio de diatomeas (Peña 1995), cianophytas (Flores 1996) y dinoflagelados (Colato 1996). En la actualidad se cuenta con estudios en composición y abundancia de fitoplancton marino (Rivera y Cuellar 2010); además, para la prevención de las floraciones algales nocivas se establece un monitoreo en las costas salvadoreña por parte del Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de El Salvador y con dicha información se elabora el Atlas de Fitoplancton Marino de El Salvador (Espinoza et al. 2013).

En el país los estudios de fitoplancton de agua continental tienen su primer aporte en el año de 1990, cuando Carballo publica un análisis de fitoplancton y zooplancton en el río Belén, Zapotitán; es importante mencionar que antes de este aporte significativo Hustedt (1953), registró algunas especies de fitoplancton en arroyos termales.

En años posteriores Monterrosa (1992) realiza una caracterización de algas y protozoos e insectos acuáticos presentes en las comunidades planctónicas y bentónicas del río Chagüite; asimismo Monterrosa y Gutiérrez (1992) presentan un estudio de plancton y algas bentónicas en el Río Talnique y es Aguillón (1995), quien realiza el primer estudio en el que se relaciona la comunidad fitoplanctónica con las variables físico-químicas.

Los aportes en el conocimiento de fitoplancton continental en El Salvador han sido orientados en el estudio de microalgas desde su uso como bioindicadores. Entre los aportes se encuentra el análisis de abundancia y distribución de microalgas presentes en el Río Lempa y planta potabilizadora, Las Pavas, ANDA; en el cual se reportan 14 géneros de la división Cyanophyta, 27 géneros de la división Chlorophyta y 37 géneros de la división Chrysophyta, descrita como una de las más abundantes (Martínez y Castro 2012). También se cuenta con el diagnóstico de las poblaciones de cianobacterias y microalgas presentes en el proceso de potabilización en la planta Las Pavas, ANDA, San Pablo Tacachico. En este estudio se

reportaron 5 divisiones 35 géneros y 39 especies de las cuales las más abundantes son *Anabaena sp.*, *Aphanizomenon sp.*, *Oscillatoria sp.* y *Pediastrum sp.* (Ortez 2014). Los estudios antes mencionados, corresponden a contribuciones al conocimiento del fitoplancton en sistemas lóticos en relación a plantas potabilizadoras de agua.

Con respecto al análisis de las comunidades fitoplanctónicas en los ecosistemas léticos, Olivares (2013) realizó un estudio de abundancia y distribución de cianobacterias (*Microcystis sp.*, *Anabaena sp.* y *Oscillatoria sp.*) en el lago de Ilopango. En dicho estudio se observó que *Microcystis sp.*, es una de las especies más frecuente y presenta una clara distribución homogénea, no encontrándose diferencias significativas entre las profundidades muestreadas, además, se identificaron los géneros *Anabaena sp.* y *Oscillatoria sp.*, en menor frecuencia especies que presentaron distribución significativamente heterogénea.

En años más recientes Quintanilla *et al* 2020 reporta algunas de las floraciones algales en agua dulce en la zona centro-occidental del país en la cual se identificaron ocho géneros causantes de proliferaciones, de los cuales siete pertenecen a la clase Cyanophyceae (*Cylindrospermopsis sp.*, *Anabaena sp.*, *Dolichospermum sp.*, *Microcystis sp.*, *Raphidiopsis sp.*, *Synechococcus sp.* y *Lyngbya sp.*) y uno a la clase Dinophyceae (*Gymnodinium sp.*).

3.2 Generalidades del fitoplancton

Los cuerpos de agua albergan una amplia variedad de formas de vida que en su conjunto establecen comunidades biológicas. Entre las comunidades que se desarrollan dentro de este hábitat con éxito se encuentra el fitoplancton; considerado un ensamble de microorganismos planctónicos fotoautótrofos con algunas especies que pueden ser heterotróficas por cortos periodos de tiempo; estos se presentan suspendidos en la zona fótica de la columna de agua y están adaptados a la suspensión en las aguas abiertas de los sistemas léticos, en la zona pelágica del mar, o en los ríos sometidos a movimientos pasivos por el viento y las corrientes (Aguillón 1995).

En su mayoría la comunidad fitoplanctónica está compuesta por microalgas que desempeña un papel ecológico importante en los ecosistemas acuáticos; son consideradas los principales productores de este ecosistema y junto con las bacterias conforma la base fundamental de las cadenas tróficas, siendo las responsables de la captación y transferencia

de energía y materia a nivel trófico superior (Rhyther 1969, Sherr y Sherr 1991). Además de contribuir en el ciclo del dióxido de carbono; la fotosíntesis del fitoplancton ayuda a la eliminación de dióxido de carbono liberado por la quema de combustibles fósiles y las actividades agrícolas (Graham *et al.* 2009). En los ecosistemas lóticos y lénticos se considera al fitoplancton fundamental por sus efectos sobre la dinámica de los gases disueltos y los nutrientes (Ramírez y Viña 2000).

Las primeras clasificaciones de las microalgas se basan en la pigmentación. Hoy en día se incluyen características tales como forma externa, presencia o ausencia de flagelo, tipo de sustancia de reserva alimenticia, moléculas presentes en la pared celular, organización celular, tipo de reproducción y ciclos de vida. (Hernández-Morales *et al.* 2011). Sin embargo, estos sufren constantes cambios entre los órdenes, familias y géneros, gracias a los adelantos genéticos y moleculares que determinan nuevas relaciones filogenéticas (Peña *et al.* 2005).

Dentro de este grupo existe un amplio rango de tamaños y formas celulares. De acuerdo a Reynolds (1984), el tamaño de los organismos que componen el fitoplancton se clasifica en picoplancton desde los 0-2.2 μm , nanoplancton 2.2-20, μm , microplancton 20-200 μm y mesoplancton 200-2000 μm . De una manera muy sencilla el efecto del tamaño es una adaptación de las células para permanecer en la zona fótica. Las diversas formas celulares también contribuyen a este efecto. Las células esféricas o elipsoidales se hunden más lentamente, mientras las formas elongadas o complejas reducen esta capacidad. También se observa la presencia de ciertas estructuras tales como vesículas de gas o aerotopos, flagelos y vaina mucilaginosa (Wehr *et al.* 2015).

Los dinoflagelados como *Ceratium* mantienen su posición en la columna de agua por su migración activa por el cambio de forma y tamaño de sus proyecciones. Las paredes silíceas de las diatomeas pueden resultar pesadas y ser susceptibles al hundimiento. En el caso de algunas cianobacterias producen mucílagos extracelulares lo que le ayuda a su flotabilidad, además de la presencia de vesículas de gas que las mantiene en la columna de agua como es el caso de *Anabaena* y *Microcystis* (Wehr *et al.* 2015).

Los ciclos de vida de las algas planctónicas son cortos e incluyen la formación de esporas de resistencia, con las cuales sobreviven a periodos desfavorables como una forma

de conservar su diversidad genética. Las algas fitoplanctónicas incluyen procesos reproductivos asexuales y sexuales (Bold y Wynne 1985); la asexual, por ejemplo, en el caso de las algas verde azules es típicamente fisión binaria y en otras algas unicelulares es mitosis; el método de reproducción asexual consiste simplemente en la división repetida de un mismo organismo resultando en el incremento de la biomasa en una población, que no implica recombinación genética. Contrariamente, la reproducción sexual implica la recombinación genética y con ella el aumento de la variabilidad en una población y en esta se puede observar oogamia, isogamia o anisogamia (Graham *et al.* 2009).

Las algas pueden presentar alternancia entre la reproducción sexual y asexual o entre fases somáticas y fases nucleares de un organismo y se diferencian tres tipos que de acuerdo al sitio dónde ocurre la meiosis, se denominan cigótica, gamética o esporofítica. Bajo estos conceptos y dependiendo de la predominancia genética las algas fitoplanctónicas pueden presentar: ciclo de vida cigótica (haplobióntico haploide), ciclo de vida gamética (haplobióntico diploide) y ciclo de vida esporofítica o alternancia de generaciones (diplobióntico haplo-diploide) (Graham *et al.* 2009). En el caso de las diatomeas (Bacillariophyceae) el ciclo de reproducción está muy ampliamente descrito, estas se alternan entre la reproducción asexual por división celular, que es la más frecuente, y la reproducción sexual (Reynolds 2006).

3.3 Fitoplancton de agua continental

El fitoplancton de agua continental se desarrolla en ambientes lénticos que incluyen aguas estancadas, lagos, lagunas y embalses, además de ambientes lóticos, como los manantiales, arroyos, cascadas y canales. De acuerdo a estudios realizados por Parra y Bicudo (1996), Zalocar *et al.* (1998), Bort *et al.* (2005) y Hernández-Morales *et al.* (2011), Mediana (2016) tomando en cuenta la actual clasificación Guiry y Guiry (2021). Los grupos taxonómicos con mayor representatividad en estos ecosistemas corresponden a las Cianobacteria (Cyanophyta), Chlorophyta, Cryptophyta, Euglenozoa, Ochrophyta, Bacillariophyta y Charophyta.

Los ambientes con mayor número de especies son los lagos seguido de las lagunas (Oliva-Martínez 2014). El fitoplancton generalmente presenta un ciclo anual previsible. En

lagos tropicales profundos se conoce que existe un patrón en la sucesión biológica, influenciada por la hidrodinámica de la columna de agua y eventos meteorológicos (Salmaso 2000), los cuales crean condiciones específicas para la proliferación de diferentes grupos algales, predisponiendo un incremento o descenso de los consumidores primarios y secundarios (Lugo *et al.* 1999).

De acuerdo Hernández-Morales (2011), el comportamiento del fitoplancton continental en lagos profundos de origen volcánico presenta una variación estacional en la abundancia. Con respecto a la época seca, sobresale la proliferación de Bacillariophytas, característica de la sucesión algal en sistemas tropicales (Alvarado 2003). Sin embargo, para la primavera sobresalen las algas verdes, grupo característico de la estratificación temprana en lagos templados (Lewis 1978), proliferación que no sigue el patrón de lagos tropicales, en donde las cianobacterias son el grupo dominante en la columna de agua en esta época (Vázquez *et al.* 2005).

Los ecosistemas lóticos están en continuo movimiento lo que permite una oxigenación constante y una renovación de nutrientes. Los manantiales fríos, ricos en carbonatos, fosfatos y nitratos pueden tener una representación importante de Cyanophytas y Bacillariophytas. A diferencia de los ríos y arroyos que tiene distinta profundidad, caudal, lecho, turbidez, concentración de nutrientes y aporte o carga de contaminantes, producto de la influencia antropogénica la comunidad fitoplanctónica es muy diversa en dependencia de las variaciones estacionales y espacio temporales, puede existir predominio de Chlorophytas, cianobacterias y Bacillariophytas (Vinocur 2001, Montoya-Moreno *et al.* 2013).

Debido a sus características de reproducción, su ciclo de vida cortos, su rápida respuesta a los cambios ambientales y la capacidad de adquirir mayor resistencia o tolerancia a diversas sustancias son utilizados como bioindicadores en la definición del estado trófico de arroyos, ríos y lagos (De la Lanza *et al.* 2000).

3.4. Principales grupos taxonómicos de fitoplancton de agua continental.

3.4.1. Phylum Cyanobacteria

Son organismos procariotas que carecen de membrana nuclear, son autótrofos, capaces de realizar fotosíntesis con liberación de oxígeno al igual que las plantas superiores. Son conocidas como cianobacterias y tradicionalmente llamadas por su coloración, algas verde-azules o cianofíceas debido a sus pigmentos clorofila *a* y ficocianina; estos pigmentos les permiten aprovechar radiaciones de longitudes de onda que muy pocos organismos pueden utilizar en agua dulce. Algunas especies también son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico (Graham *et al.* 2009).

Las cianobacterias suelen desarrollar densas poblaciones debido a su capacidad para crecer y reproducirse bajo distintas condiciones de nutrientes. Logran regular su posición en la columna de agua, consiguiendo distribuirse en la masa de agua o concentrarse en la superficie, gracias a que la mayoría de las cianobacterias planctónicas cuentan con vesículas de gas intracelulares, vacuolas gaseosas o aerotopos (Oliver y Ganf 2000). Las cianobacterias presentan una amplia diversidad morfológica, pueden ser unicelulares aisladas, agrupadas en colonias, filamentosas, ramificadas o no ramificadas (Graham *et al.* 2009).

En los organismos filamentosos pueden encontrarse células modificadas: los heterocistos y/o los acinetos. Los heterocistos son células modificadas con morfología variada, poseen un engrosamiento polar en el extremo celular que se encuentra en contacto con la célula contigua, pueden o no tener vaina y están relacionados con la fijación de nitrógeno atmosférico. Por otra parte, los acinetos son células modificadas de formas y tamaños variados y de contenido granular, pueden o no poseer vaina y su función principal es la de asimilar sustancias de reserva, actuando como estructura de resistencia ante situaciones de estrés (Giannuzzi 2009).

3.4.2 Phylum Chlorophyta

Se conocen como algas verdes, la mayoría se desarrollan en ecosistemas de agua dulce. Son microorganismos multicelulares con algunas especies unicelulares que pueden formar filamentos o colonias (Parra *et al.* 1982). Su sustancia de reserva es el almidón y su

pared celular se encuentra constituida por celulosa. Los pigmentos fotosintéticos son la clorofila *a* y *b*, sus pigmentos accesorios presentan xantofilas, luteína, violaxantina, anteraxantina, neoxantina. Las algas verdes son las únicas que presentan el nivel de organización cenocítico o sifonoso (Oliva-Martínez 2014). Algunos géneros representativos son: *Carterias*, *Coelastrum*, *Dictyosphaerium* y *Monoraphidium* (Bort *et al.* 2005).

3.4.3 Phylum Cryptophyta

Es un grupo de organismos relativamente pequeño, en el que dominan las formas unicelulares aisladas y móviles que tienen uno o varios flagelos; contienen clorofila *a* y *c₂*, como pigmentos accesorios: alfa y beta carotenos, xantofila diatoxantina, así como ficobilinas, ficoeritrina y ficocianina. La principal sustancia de reserva es el almidón que se almacena en pirenoides, en el exterior de la membrana del cloroplasto. La reproducción asexual se produce por división longitudinal, entre los géneros más conocidos se encuentra las *Cryptomonas erosa* y las *Rhodomonas minuta* (Graham *et al* 2009, Roy *et al.* 2011).

3.4.4 Phylum Euglenozoa

Son conocidos como euglenoides y el género más común es *Euglena*. Poseen flagelos que les permiten la movilidad, estos tienen un fotorreceptor denominado punto ocular, que permite determinar la dirección de la fuente de luz; la mayoría viven en agua dulce, especialmente rica en nutrientes. Sus reservas de carbohidratos están constituidas por paramilón, un tipo de polisacáridos que no se encuentra en ningún otro tipo de organismos. Aproximadamente la tercera parte de los euglenoides son fotosintéticos, el resto son heterótrofos. La reproducción es por división celular estos contienen varios cloroplastos y una sola vacuola contráctil que recoge agua de la célula y la expulsa al exterior (Roy *et al.* 2011).

3.4.5 Phylum Ochrophyta

Son microorganismos unicelulares que presentan clorofila *a*, *c₁*, *c₂*, *c₃*, fucoxantina, violaxantina, diadinoxantina y diatoxantina, poseen una pared celular de sílice, leucocina; con crisolaminarina de sustancia de reserva. En ambientes dulceacuícolas las clases más

frecuentes son Chrysophyceae, Raphidophyceae, Eustigmatophyceae y Xanthophyceae (Graham *et al.* 2009, Oliva-Martínez *et al* 2014).

3.4.6 Phylum Bacillariophyta

Comúnmente conocidas como diatomeas, constituye uno de los grupos más frecuente del fitoplancton en medios dulceacuícolas. La mayoría hacen fotosíntesis y presentan clorofila *a* y *c*, y pigmentos accesorios como β -caroteno y fucoxantina. Algunas son capaces de vivir en medios donde llega poca luz, y donde hay altas concentraciones de materia orgánica condiciones en el cuales presentan metabolismo heterótrofo (Round *et al.* 1990).

Muchas diatomeas son unicelulares, aunque algunas de ellas pueden existir como colonias en forma de filamentos o cintas. Una característica especial de este tipo de algas es que se encuentran rodeadas por una pared celular única hecha de sílice (dióxido de silicio hidratado) llamada frústula; estas frústulas muestran una amplia variedad de formas, que generalmente está constituida por dos partes asimétricas llamadas thecas; la pieza principal de cada theca es denominada valva y al conjunto de las bandas o cinturones que sirven para unir a las dos valvas que forman al frústulo se le llama cingulo. En un frústulo siempre hay una theca un poco más pequeña que la otra, por lo que se distingue entre epitheca (la más grande) e hypotheca (la más pequeña). Algunos géneros representativos de diatomeas son: *Cyclotella*, *Navícula*, *Nitzschia* y *Synedra* (Maidana y Seeligmann 2006).

3.4.7 Phylum Charophyta

Es un grupo de algas unicelulares y filamentosas con tilacoides variablemente asociados, presentan clorofila *a*, *b*, *c*; α , β , γ - carotenos, xantofilas, poseen dos flagelos generalmente apicales y desarrollan una pared celular compuesta por celulosa. Entre algunos géneros de esta división de microalgas se tienen: *Closterium*, *Staurastrum* y *klebsormidium* (Oliva-Martínez 2014).

3.5 Factores Físico-Químicos que inciden en el desarrollo del fitoplancton continental

El desarrollo del fitoplancton está sujeto a diversas variables físico-químicas tales como: radiación solar (luz), temperatura, pH, turbidez, sólidos disueltos, oxígeno disuelto y

nutrientes tales como nitrógeno y fósforo (Roldán y Ramírez 2008, Giannuzzi 2009, Reguera *et al.* 2011, Hernández-Morales *et al.* 2011).

3.5.1 Radiación solar

Desde el punto de vista limnológico la luz que penetra en el agua estará afectada por la latitud, la altitud, la época del año, la hora del día y las condiciones climáticas. La cantidad de luz que pase por la columna de agua sufrirá los procesos de absorción y dispersión hasta alcanzar el máximo potencial de intensidad lumínica (Romero *et al.* 1988). Estas variaciones estimularán diferentes procesos en las microalgas de agua dulce tales como; la alteración del contenido pigmentario (Figueroa *et al.* 2003), la acumulación de pigmentos fotoprotectores (Koibee *et al.* 2005) cambios en los patrones de movilidad y orientación (Gerber y Häder 1993) o la inhibición del crecimiento y reproducción (Margalef 1983, Bañares *et al.* 2002, Altamirano *et al.* 2003).

El aumento de la radiación como consecuencia de la disminución de la capa de ozono estratosférico (Frederick *et al.* 1993) ha sometido a las microalgas a un mayor estrés lumínico, por lo que se han descrito numerosos efectos negativos de la radiación, como la formación de dímeros de timina en el ADN, la fotoinhibición de la fotosíntesis y la inhibición de la incorporación de nutrientes (Viñegla y López-Figueroa 2009) sin embargo, grupos como las cianobacterias al tener pigmentos altamente eficientes en el aprovechamiento de la luz solar, muestran una alta eficiencia en sus tasas de crecimiento y reproducción (UNESCO 2009).

3.5.2 Temperatura

La cantidad de luz que es absorbida por un cuerpo de agua aumenta exponencialmente con la distancia del paso de la luz por la solución. El 90% de la longitud de onda de 750 nm es absorbida en un metro de profundidad (dependiendo del estado trófico del sistema epicontinental). El alto calor específico del agua permite la acumulación de esta longitud de onda como energía calórica. La distribución de calor en los sistemas depende de la morfometría, especialmente de la profundidad máxima y relativa, del viento y las corrientes (Dorador *et al.* 2003).

Dentro de los sistemas epicontinentales podemos encontrar a los lagos y sistemas lacustres que desde el punto de vista hidrológico son considerados una extensión de agua salada o dulce estancada, abastecidos principalmente por la lluvia que cae directamente sobre ellos, o por las aguas subterráneas provenientes de las formaciones subyacentes y por las corrientes superficiales que bañan la cuenca; a su vez, los lagos alimentan depósitos subterráneos y corrientes superficiales que pueden ser el origen de importantes manantiales y el destino de numerosas redes de agua subterránea (Viessman *et al.* 1977).

Las diferencias de densidad en las aguas de los lagos resultan del gradiente térmico, e influyen sobre la circulación vertical de las aguas a lo largo del año. La circulación general depende de la temperatura y, por consiguiente, está ligada al clima de la región. (Benjumea y Wills 2007).

Los lagos de regiones templadas siguen un comportamiento de estratificación estacional (invierno, primavera, verano, otoño); en ellos se identifica una región superficial mezclada por el viento y con temperaturas más o menos uniformes que se denomina epilimnion o zona de continuidad térmica; una región más fría de aguas más pesadas y poco afectadas por el viento: el hipolimnion. Separando estas dos regiones del lago hay una zona transicional intermedia donde la temperatura cae rápidamente con la profundidad, conocida como metalimnion. Dentro de esta zona hay una región donde el gradiente de temperatura que se origina es más pronunciado llamado termoclina, que es considerado en ocasiones un plano imaginario dentro del lago, localizado a un nivel intermedio entre dos profundidades donde la disminución de la temperatura es mayor (Roldán y Ramírez 2008).

Los lagos de regiones tropicales en donde la radiación es más o menos constante. Los tipos de estratificación varían de acuerdo con el clima, la morfología, la profundidad y la composición química del lago, así como también con su posición geográfica por lo que se habla de lagos de aguas cálidas, templadas y frías (Roldán 2003).

Lewis (1983), propuso la clasificación de los lagos en función de sus características de estratificación térmica y mezcla, que son las más importantes desde el punto de vista biológico, los tipos fundamentales son los siguientes:

- **Amícticos:** lagos siempre cubiertos de hielo.

- **Monomícticos fríos:** lagos cubiertos de hielo la mayor parte del año, libres de hielo durante la estación cálida, nunca la temperatura supera los 4°C.
- **Polimícticos fríos continuos:** lagos cubiertos de hielo la mayor parte del año excepto durante la estación cálida por encima de 4°C y estratificado casi diariamente durante ella.
- **Polimícticos fríos discontinuos:** lagos cubiertos de hielo la mayor parte del año excepto durante la estación cálida, por encima de los 4°C y estratificación casi diariamente durante ella.
- **Polimícticos fríos discontinuos:** lagos cubiertos de hielo sólo durante parte del año, libres de hielo cuando alcanzan temperaturas por encima de los 4°C; estratificados durante la estación cálida, por periodos de varios días a semanas, pero con intervalos de interrupción de mezcla.
- **Dimícticos:** cubiertos de hielo parte del año, pero con mezclas en las transiciones entre estos dos estados.
- **Monomíctico cálido:** lagos nunca cubiertos de hielo; estratificación estable parte del año; mezclados una vez al año.
- **Polimícticos cálidos discontinuos:** lagos que nunca presentan una cubierta de hielo; estratificados por días o semanas y mezclados más de una vez por años.
- **Polimícticos cálidos continuos:** lago sin cubierta de hielo, estratificado durante pocas horas.

La temperatura regula la reproducción de las especies fitoplanctónicas aumentando sus poblaciones. En las regiones en donde existen notables variaciones de temperatura en el transcurso del año, las especies sólo se reproducen cuando se presentan las temperaturas favorables para ellas y deja de hacerlo durante las extremas (Roldán 2003). Las distintas divisiones de algas se desarrollan dependiendo de un rango de temperatura, las diatomeas crecen en rangos de 5°C a 20°C, las algas verdes y pardas entre 15°C y 30°C.

Estudios han comprobado que las cianobacterias crecen mejor a temperaturas comprendidas entre los 15°C y los 30°C (Reynolds 2006), sin embargo; la UNESCO (2009), establece un rango más estrecho entre los 25°C y 30 °C, además, de plantear que las algas eucariotas prefieren temperaturas más altas para su crecimiento. La FAO (2008), establece

que el rango óptimo para el desarrollo de la mayoría de microalgas, se encuentra entre los 18°C y 22 °C.

3.5.3 Potencial de hidrógeno pH

Está determinado por la concentración de iones de hidrógeno libres y está influenciado por los procesos biológicos dentro del ecosistema. De acuerdo con Hernández-Morales (2011), las comunidades fitoplanctónicas se desarrollan con mayor facilidad en pH básico. Además, De León (2000), destaca las aguas duras (pH alcalino) como una de las causas que favorecen y controlan el desarrollo de las floraciones de cianobacterias. Los valores elevados de pH se corresponden con aguas muy productivas con alto contenido de oxígeno (Lara-Rodríguez *et al* 2015).

3.5.4 Turbidez y color

La turbidez se relaciona con las partículas disueltas en el agua, estas partículas sólidas bloquean la luz solar y evitan que el fitoplancton obtenga la luz que necesitan para la fotosíntesis (Panilla 2005). Los lagos tropicales se mezclan más fácilmente que los lagos templados, la disminución de la turbidez favorecerá el establecimiento del reloj sucesional de las comunidades fitoplanctónicas. La medida de transparencia es importante para la determinación de eutrofización en un ecosistema lacustre (Mora 2015).

El color brinda una idea cualitativa de la productividad del sistema acuático. Existe una gran variedad de colores en el agua y estas dependen de forma directa de los sólidos disueltos originados en la descomposición natural de la materia orgánica (principalmente vegetales, ácidos húmicos y fúlvicos) el hierro y el manganeso y residuos industriales (De la Parra y Rodelo 2011).

3.5.5. Oxígeno disuelto

Toda la vida acuática depende de la disponibilidad de oxígeno disuelto (OD), la fuente principal de oxígeno es el aire el cual se difunde rápidamente en los ríos por la turbulencia y en los lagos por el viento; la cantidad de oxígeno presente en estos cuerpos de agua estará afectada por la temperatura, la salinidad y la presión atmosférica (Sawyer y McCarty 1978). La concentración de oxígeno en agua será inversamente proporcional con la

temperatura, por lo que el oxígeno presentará valores decrecientes hacia el fondo (Clausen 1936).

Una de las fuentes importantes de oxígeno en los ecosistemas lénticos corresponde a la alta productividad fotosintética de las comunidades fitoplanctónicas, directamente relacionadas con la zona fótica y limitadas en la profundidad donde se alcanza el nivel de compensación, es decir, donde la fotosíntesis equilibra a la respiración (Horne y Goldman 1994). El aumento de la abundancia de fitoplancton estará asociado a una alta concentración de oxígeno durante el día y a una baja concentración de oxígeno durante la noche; fenómeno que frecuentemente ocasiona anoxia y puede ser crítico para otro tipo de especies que ocurren en el sistema que no poseen estos rangos de tolerancia o adaptación (López y Méndez 2013, Forero *et al.* 2014).

3.5.6 Nutrientes

Dentro de los nutrientes de los ecosistemas acuáticos el nitrógeno (N) y el fósforo (P) constituyen los principales agentes que regulan la estructura de las comunidades fitoplanctónicas (Sánchez *et al.* 2011). La excesiva concentración de estos elementos en el agua es una de las mayores causas de la eutrofización de los lagos, embalses y ríos (Bustamante 2002).

El nitrógeno es un elemento directamente asociado con el metabolismo primario de las microalgas, pues forma parte de los ácidos nucleicos y proteínas. A nivel bioquímico, la limitación de nitrógeno influye directamente en el suministro de aminoácidos, que a su vez limita la traducción de ARNm y por lo tanto reduce la tasa de síntesis de proteínas. Bajo condiciones limitadas de nitrógeno también la eficiencia del PSII (fotosistema II) disminuye, principalmente como consecuencia de la disipación de la energía de excitación absorbida en el lecho del pigmento. Como la limitación de nitrógeno conduce a una reducción del crecimiento y tasas fotosintéticas, también conduce a una reducción de las tasas respiratorias (Kumar *et al.* 2010).

El fósforo es un elemento valioso para la organización y función celular sirve de componente básico para la estructura de los ácidos nucleicos y de las moléculas de ATP (Trifosfato de adenosina). En comparación con el nitrógeno la abundancia es diez veces

menor pero su efecto sobre la eutrofización es mucho mayor, ya que cantidades del orden de milésimas de miligramo, pueden activar crecimientos de fitoplancton que afectan significativamente la estructura y funcionamiento del ecosistema acuático (Barsanti y Gualtieri 2006).

El fósforo es a menudo citado como el nutriente más importante en el control del fitoplancton de los lagos. Esta conclusión, deriva mayormente de estudios en regiones templadas de América del Norte y de Europa, sin embargo, es irrealista esperar que todos los lagos estén limitados por el mismo nutriente; en realidad, algunos estudios sugieren que los lagos en las regiones tropicales están más frecuentemente limitados por el nitrógeno que por el fósforo (Vincent *et al.* 1984).

Por lo que se hace importante aclarar que el concepto de nutriente limitante está basado en el crecimiento de plantas acuáticas y la relación molar N/P. El valor de esta relación la determina el nutriente limitante en el cuerpo de agua. Así el nutriente que controla la máxima cantidad de biomasa es aquel que se consume primero o que alcanza un mínimo antes que los demás nutrientes en la estequiometría de la reacción. Como regla general se considera que cuando la relación molar N/P es >16 , cabe esperarse que el P sea el factor limitante. Cuando $N/P=16$ ninguno de los nutrientes es limitante; es decir, ambos elementos constituyen la proporción atómica en el fitoplancton, y cuando $N/P<16$, el nutriente limitante debería ser el N; es decir, que el N es menos abundante que el P con respecto a la demanda metabólica del fitoplancton (Redfield 1958). Por lo que la medición de estos elementos se vuelve crucial para describir el comportamiento de las comunidades fitoplanctónicas (Ramírez *et al.* 2012).

3.6 Impacto de las proliferaciones algales en el agua continental.

Una proliferación algal en sentido estricto es considerada un fenómeno natural, que se presentan en los ecosistemas acuáticos, causados por organismos fitoplanctónicos que, en condiciones ambientales favorables para su desarrollo, se multiplican explosivamente y se concentran en determinadas localidades, causando alteraciones a la vida acuática y a la economía de las áreas afectadas (Reguera 2002). Estas pueden producir cambios de

coloración en el agua y pueden ser dominadas por especies tóxicas como no tóxicas (Anderson *et al.* 2001).

La aparición de proliferaciones masivas, o floraciones, de organismos del fitoplancton en agua continental se relacionarán con los procesos de eutrofización (Smith y Schindler, 2009); proceso natural producto del enriquecimiento del cuerpo de agua con nutrientes; causado principalmente por el aporte de una carga de fósforo y/o nitrógeno en una tasa mayor a la que el sistema puede procesar (Whitton y Potts 2000). El origen es siempre diverso, pero se destacan como aportes puntuales los desechos orgánicos urbanos, domésticos e industriales, y los aportes difusos por escorrentía, mayoritariamente inorgánicos, que provienen de la actividad agrícola-ganadera (Russell y Hunter 1970, UNESCO 2009).

Los grupos fitoplanctónicos frecuentes en las proliferaciones algales en agua continental corresponden a las Chlorophyta (*Spirogyra*, *Hydrodictyon*, *Chlorella* y *Ankistrodesmus*), las Diatomeas, (*Synedra* y *Cyclotella*) los flagelados (*Cynura*, *Euglena* y *Chlamydomonas*) y las cianobacterias (*Microcystis*, *Dolichospermum* y *Oscillatoria*) (Vinocur 2001, Sar *et al* 2002).

Las floraciones de cianobacterias son las más estudiadas y conocidas porque estos organismos pueden producir metabolitos bioactivos (cianotoxinas) que constituyen un serio problema ambiental con graves repercusiones sobre la salud humana y animal (Chorus y Bartram 1999). El incremento de biomasa, además de ocasionar problemas estéticos como la aparición de espumas y olores desagradables, altera el sabor del agua de consumo y, al descomponerse, causa desoxigenación modificando la química del agua, cambios que influyen en la supervivencia de los animales acuáticos (Alcocer *et al.* 2015). Por lo que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) todas las floraciones de cianobacterias deben ser consideradas en un principio potencialmente tóxicas por ende un riesgo para la salud humana (Giannuzzi, 2009).

3.7 Análisis de fitoplancton continental a partir de grupos morfo-funcionales

Tradicionalmente para describir la estructura y la dinámica ecológica de las comunidades de fitoplancton, se utilizan grupos taxonómicos, es decir, las relaciones de

parentesco, principalmente a nivel de clases u órdenes. Sin embargo; si se considera que los organismos que co-ocurren en la comunidad fitoplanctónica tienen requerimientos ambientales similares (Webb *et al.* 2002), como la adquisición de luz y nutrientes, un enfoque taxonómico basado en las relaciones de parentesco, no sería el más adecuado para reflejar el desempeño ecológico de los organismos en el ambiente (Kruk *et al.* 2010).

Esto se debe a que un mismo grupo taxonómico puede estar comprendido por organismos con tolerancias y requerimientos ambientales muy diversos, por lo que, en niveles taxonómicos elevados pueden encontrarse organismos con estructuras y formas de vida muy distintas (Reynolds 1997); a la inversa, organismos que responden de forma similar al ambiente pueden estar muy alejados filogenéticamente y sin embargo co-ocurrir (Costa *et al.* 2009). Es por esta razón que se han desarrollado clasificaciones alternativas en las cuales el criterio de agrupación de los organismos no es la filiación taxonómica.

Una de estas clasificaciones desarrollada principalmente para organismos marinos es propuesta por Margalef (1976), este representó el cambio estacional de la comunidad fitoplanctónica como función directa de los nutrientes y de la turbulencia. Sugirió que estos factores actúan como la principal fuerza que selecciona a los organismos según sus estrategias de vida. A partir de esto identificó dos formas de vida o estrategias de vida; r y K en referencia a las estrategias de vida de MacArthur y Wilson (1967). La estrategia de vida r la tendrían organismos de pequeño tamaño, con alta tasa de crecimiento y adaptados a condiciones de alta turbulencia y altos nutrientes. La estrategia de vida K la tendrían organismos de gran tamaño y tasa de crecimiento baja, quedando seleccionados en sistemas con baja turbulencia y pocos nutrientes.

Por otro lado, Reynolds (1988), adaptó las tres estrategias de historia de vida creadas por Grime (1977) para las plantas a organismos fitoplanctónicos en su mayoría dulceacuícolas. Al igual Margalef (1978) consideró a los nutrientes (fuente de estrés) y a la permanencia en la zona eufótica (ausencia de disturbios), como los dos factores principales que seleccionan a los organismos que componen el fitoplancton. Identificó tres estrategias de vida primarias que incluyen a los nutrientes y al tiempo de permanencia en la zona eufótica. En un ambiente con alta concentración de nutrientes y alta permanencia en la zona eufótica

dominan los organismos con estrategia de vida C (colonizadores). Estos son organismos mayoritariamente unicelulares, con una tasa de crecimiento poblacional alta; los S-estrategas (estrés tolerante) dominan en ambientes con alto estrés (baja concentración de nutrientes); ellos pueden adquirir y almacenar los nutrientes aún en muy bajas concentraciones, siendo esto su principal ventaja.

Los estrategas R (ruderales) se desarrollan en condiciones de alta concentración de nutrientes y baja permanencia en la zona eufótica dado que resisten estar por un tiempo prolongado fuera de la zona eufótica sin que esto implique grandes pérdidas de biomasa. Son organismos que crecen a bajos umbrales de luz y por lo general tienen una relación superficie/volumen (S/V) alta que favorece la captación de luz.

Reynolds *et al.* (2002), establecen un hito en la aplicación de grupos funcionales. Este enfoque prueba cuantitativamente las relaciones mutuas de los grupos funcionales (FG) y sus vínculos con las principales limitaciones ambientales. postulando 31 asociaciones: grupos de especies (en su mayoría polifiléticos) que responden de manera similar frente a cambios en el ambiente, debido en gran medida, a rasgos adaptativos compartidos. Esta clasificación ha sido ampliamente utilizada en sistemas tan diversos como lagos alpinos hasta estuarios tropicales (Dokulil y Teubner 2003, Costa *et al.* 2009).

Para que una clasificación refleje el desempeño ecológico de los organismos que la componen tiene que estar basada en rasgos o características que tengan un efecto directo en su adecuación biológica (Reynolds 1997, Salmaso y Padisák 2007 y Kruk *et al.* 2011). Durante las últimas décadas, se han hecho varios intentos para categorizar rasgos y funciones en el fitoplancton; sin embargo, el agrupamiento de especies según las características fisiológicas es difícil (porque los datos no siempre están disponibles), lo que lleva a muchos autores a confiar en clasificaciones basadas en otros rasgos biológicos (Kruk *et al.* 2010).

Estas propuestas de clasificación simplifica la identificación de los organismos fitoplanctónicos ya que se les agrupa por rasgos morfológicos y, además; está relacionada con la adecuación biológica de los organismos por estar basada en los rasgos funcionales, y por tanto puede llegar a captar el desempeño ecológico de los organismos en el ambiente (Nogueira 2011). Por lo que Salmaso y Padisák (2007) proponen la conformación de grupos

morfo-funcionales (MFG) tomando como aspectos principales la función de sus estructuras la morfometría y caracteres taxonómicos (flagelos, organización celular, aerotopos, dimensiones, formas, mucílago, mixotrófico). Una de las características importantes de este sistema de clasificación es que este es lo suficientemente flexible para albergar un mayor número de grupos, Dependiendo de las características del hábitat analizado, además de considerarse los criterios para definir (MFG) entre los conductores más fuertes capaces de predecir los mejores competidores bajo diferentes restricciones ambientales (Salmaso *et al.* 2015).

El modelo de clasificación de grupos funcionales más reciente fue propuesto por Kruk *et al.* (2010) quienes relacionan VII Grupos Funcionales Basados en Morfología de los organismos (GFBM). La clasificación se basa en nueve descriptores: volumen, superficie, superficie en relaciones de volumen, dimensión lineal máxima y la presencia de mucílago, flagelos aerotopos, heterocistos y estructuras de exoesqueleto silíceo.

Según la clasificación Kruk *et al.* (2010), los grupos I y II se caracterizan por el pequeño tamaño y la alta relación superficie-volumen de los organismos, siendo la presencia de estructura silíceas y flagelos rasgos característicos de este último. Los GFBM IV y V están conformados por organismo de tamaño intermedio a grandes sin presencia de rasgos particulares en el primero, mientras que grupo V agrupa a organismo flagelados unicelulares. El GFBM VI incluye organismos que se caracterizan por la presencia de estructuras silíceas y la ausencia de flagelos (Diatomeas). Este grupo abarca un amplio rango de tamaño y estrategias de vida (*Cyclotella* y *Aulacoseira*). Por último, los GFBM III y VII están compuesto por los organismos de mayor tamaño filamentosos con alta relación superficie-volumen y el segundo compuesto por grandes colonias de baja relación superficie-volumen, rodeadas de mucilago (*Cylindrospermopsis* y *Microcystis*) (Figura 1).



Figura 1. Esquema de los siete grupos funcionales basados en la morfología (MBFG), incluyendo una breve descripción de su morfología. S superficie, V volumen. Fuente. Kruk *et al.* (2010).

La variación en la estructura y composición de la comunidad fitoplanctónica en lagos reflejan las adaptaciones morfológicas de las algas, como consecuencia de los cambios hidrográficos e hidroquímicos que se presentan en el ecosistema; estos cambios pueden ser percibidos a partir de la morfología funcional del fitoplancton que basada en aspectos fisiológicos y morfológicos, permiten relacionar la presencia y comportamiento de las comunidades algales con determinadas condiciones tanto físicas como químicas del cuerpo de agua (Mora 2011).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación y descripción del área de estudio

El Lago de Coatepeque se encuentra ubicado a 54 km al Sur Oeste de la ciudad de San Salvador en el Departamento de Santa Ana. La cuenca abarca el área de los Municipios Santa Ana, el Congo e Izalco, municipio de Sonsonate (Figura 7). Sus coordenadas geográficas son 13°51' N y 89°32' O (Alemán y Guerrero 2006).

El origen del lago de Coatepeque es de naturaleza volcánica y lo conforman un grupo de conos volcánicos extintos, es decir la caldera no ocupa el lugar de un solo cono central

desaparecido, sino se encuentra en el lugar que antes fue ocupado por un grupo de conos cercanos enlazados, entre los cuales se encontraba el cono primitivo del volcán de Santa Ana.

En el lugar se distingue dos pequeñas penínsulas denominadas Los Anteojos debido a su similitud en tamaño, forma y distancia, que se encuentran adyacentes al paredón de la caldera, que anteriormente se cree que fueron pequeñas islas dentro del espejo de agua; además se identifica una isla conocida como Cerro Grande o Teopán con forma de pirámide truncada (Howel y Meyer 1954).

4.1.1 Hidrografía

El lago de Coatepeque pertenece a la región hidrográfica A, denominada Río Lempa, considerada la más extensa. Este es uno de los lagos más grandes de El Salvador y cuenta con una superficie de 24.8 km²; su elevación es de 740 metros sobre el nivel del mar y su profundidad máxima es de 115 m. Se clasifica como una cuenca cerrada, es decir que su drenaje es a través de infiltración subterránea hacia las cuencas de los ríos Sucio y Suquiapa (MARN 2006).

4.1.2 Topografía y tipo de suelo

Por su ubicación geográfica, el lago de Coatepeque se encuentra influenciado por una región de relieve bastante alto, que varían desde 500 hasta 2,380 m. s. n. m. que corresponden a la cordillera Apaneca-Ilamatepec. Los paredones que lo circundan tienen alturas que varían entre 250 y 300 metros; se identifican zonas con pendiente baja que oscilan entre el 1% y 15% y zonas de pendiente alta entre 50% a 95% (Howel y Meyer 1954). Según MAG (2012), el lago de Coatepeque se encuentra influenciado por suelos litosoles de muy poca profundidad sobre roca pura, son suelos muy complejos su textura varía de gruesas a arena y grava hasta muy pedregoso que puede llegar a reducir la erosión.

4.1.3 Clima

El ecosistema lacustre de interés, se encuentra inmerso en la zona climática sabana tropical calurosa o tierra templada (**Awbig**), que de acuerdo al mapa de Köppen, Sapper y Lauer, comprende pequeñas planicies a superficies alomadas desde los 800 a 1,200 m.s.n.m.; que posee un clima cálido (Cardenal et al. 2000).

4.1.4 Zona de vida

El lago se encuentra influenciado por una de las seis zonas de vida existentes en El Salvador, según la clasificación de Leslie R. Holdridge (Cardenal et al. 2000); se encuentra influenciado por el bosque húmedo tropical (bh-ST) que se caracteriza por precipitaciones que varíen entre los 1,400 a los 2,000 mm, El patrón climático es monzónico, con época lluviosa persistente y meses de sequía que permite el desarrollo de vegetación xerofítica, donde predominan especies caducifolias o deciduas que permite identificar un bosque húmedo subtropical fresco (Cardenal et al. 2000).

4.1.5 Vegetación y Fauna

En la zona de estudio la vegetación acuática se encuentra conformada principalmente por *Ceratophyllum demersum*, *Hydrilla verticillata* y *Nymphaea ampla* la última endémica para el país y muy escasa en el lago a diferencia de *Hydrilla verticillata* que causa algunos inconvenientes a los pobladores de la zona por su sobrepoblación (Reyes 2009). Este ecosistema, además se encuentra influenciado por vegetación de cafetal con sombra en su periferia que protege e impide la erosión del suelo (Gallo et al. 2007).

De acuerdo a estudios realizados en el lago de Coatepeque entre los peces que se pueden identificar se encuentra el "pez burrita" (*Amatitlania nigrofasciata*), "guapote tigre" (*Parachromis managuensis*), "pez copetón" (*Paraneetroplus guttulatus*), "chimbolo" (*Poecilia salvatoris*), "mojarra negra" (*Amphilophus macracanthus*), "ejote" (*Melaniris guiya*) y "tilapia" (*Oreochromis sp.*) (MAG 2002, López 2005).

4.2 Diseño de muestreo

El estudio tuvo una duración de 12 meses, entre el mes de julio de 2017 y junio de 2018. Las muestras fueron recolectadas una vez al mes durante las horas de mayor actividad lumínica entre las 8:00 am y 12 pm. De acuerdo a los viajes de reconocimiento realizados en Lago de Coatepeque y tomando en cuenta las características geomorfológicas, usos y vertidos de aguas grises, identificación de las posibles zonas de inicio de proliferaciones algales, valoración de recursos disponibles y representatividad en el número de muestras, se seleccionaron y georeferenciaron 8 puntos de muestreo (Tabla 1 y Figura 2).

Tabla 1. Puntos de muestreo seleccionado en el lago de Coatepeque para la medición de parámetros físico-químicos y toma de muestras cualitativas y cuantitativas de fitoplancton.

Puntos	Característica	Coordenadas
1	Bajadero la Bendición	13 53 01.5 N, 89 31 49.1 O
2	Club de El Salvador	13 52 49.0 N, 89 32 34.7 O
3	Cardedeu	13 52 48.7 N, 89 33 17.4 O
4	Castillo del Rey	13 51 49.6 N, 89 33 46.9 O
5	Centro del Lago	13 51 52.8 N, 89 32 36.5 O
6	Los Anteojos	13 51 51.3 N, 89 31 45.8 O
7	La Peñona	13 50 57.7 N, 89 32 37.1 O
8	Isla Teopán	13 50 15.1 N, 89 33 58.1 O

La toma de la muestra se realizó a través de un muestreo estratificado que consistió en la ubicación de tres puntos en la columna de agua que corresponden a una muestra superficial, muestra de zona intermedia ubicada a 10 metros de profundidad y muestra por encima de la ubicación teórica de la zona de compensación ubicada a los 20 metros (Figura 3). Estimación realizada a partir de los datos de premuestreo de transparencia obtenidos por la medida de la visibilidad del Secchi, datos de los cual se estima la profundidad de compensación que es aproximadamente 2.7 veces la profundidad de visión del disco Secchi ($2.7 \times D$); la que se estima el oxígeno producido por fotosíntesis es igual al consumido por respiración. Esta es la capa donde la disponibilidad de la luz permite la fotosíntesis y por tanto la capa de agua apta para el crecimiento del fitoplancton (Reguera *et al.* 2011).

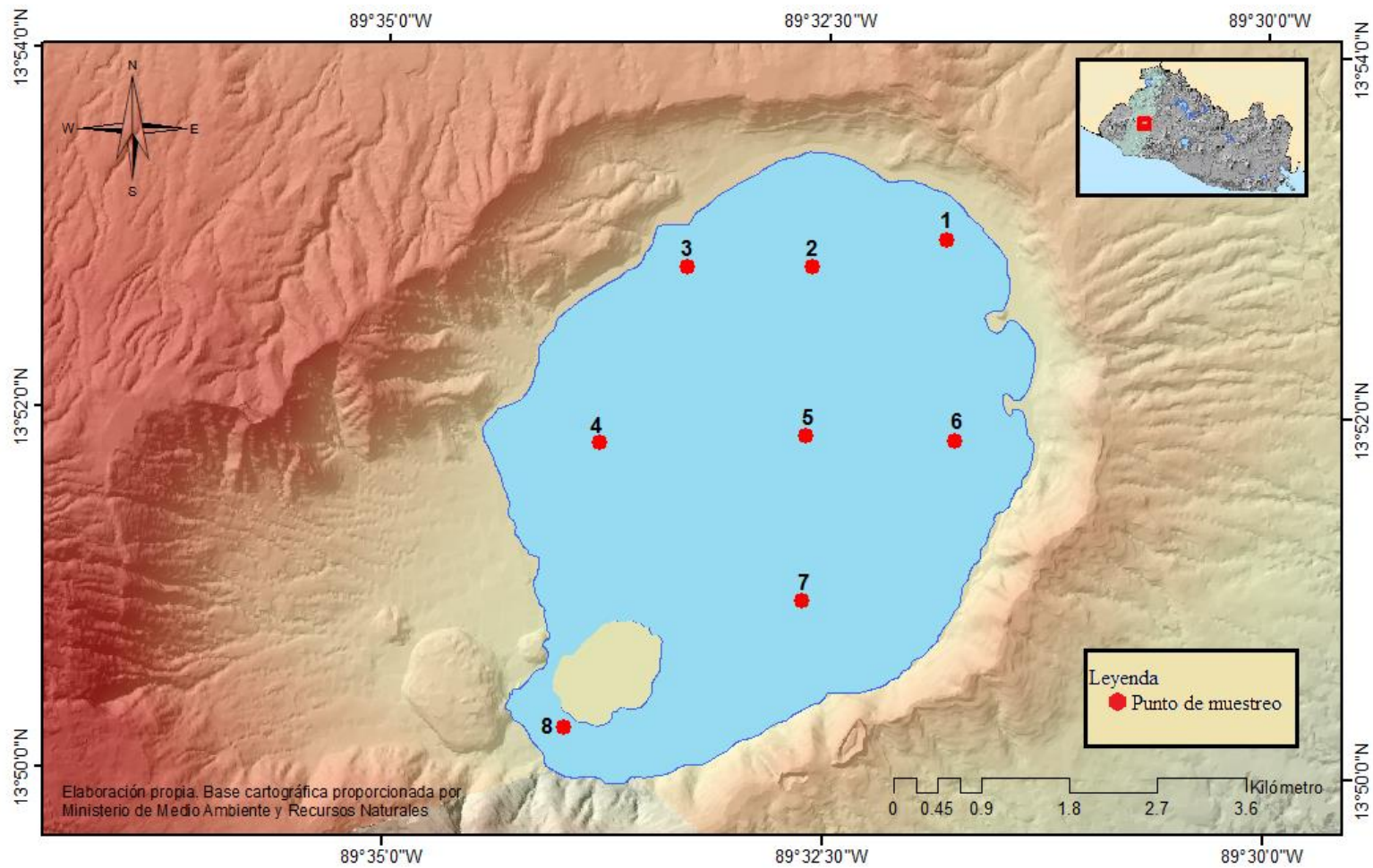


Figura 2. Mapa de ubicación del Lago de Coatepeque con los sitios de muestreo. Punto 1. Bajadero la Bendición, Punto 2. Club de El Salvador, Punto 3. Restauraste Cardedeu. Punto 4. Castillo del Rey, Punto 5. Centro del Lago Punto 6. Los Anteojos, Punto 7. La Peñona Punto 8. Isla Teopán.

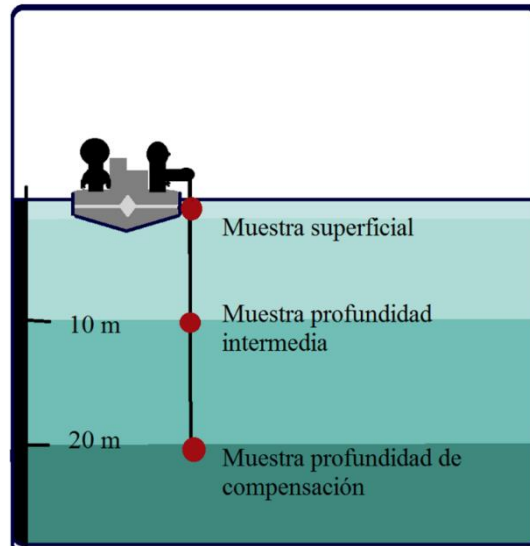


Figura 3. Esquema de muestreo estratificado en el lago Coatepeque. Muestra superficial (0M), muestra profundidad intermedia (10M) y muestras de profundidad de compensación (20M).

4.2.1 Medición de variables físico-químicas

En cada uno de los puntos de muestreo anticipadamente a las mediciones de variables físico-químicas y toma de muestras de fitoplancton, se observaron algunas características de aspectos generales del sistema acuático, tales como la presencia de olor, color, aspecto y distribución de los organismos a simple vista (UNESCO 2009).

En cada punto y profundidad de muestreo se realizaron las siguientes mediciones físico-químicas: temperatura, pH y transparencia. Para la medición de temperatura se utilizó una sonda multiparámetro marca HANNA modelo HI 9829, la medición de pH se realizó *in situ* en cada muestra con una sonda marca HANNA modelo HI 9803 y la transparencia del agua se midió con el disco Secchi.

4.2.2 Toma de muestras de fitoplancton

La recolección de organismos fitoplanctónicos para el análisis cualitativo en el lago de Coatepeque se realizó a través de una red cónica de fitoplancton de 20 μm (Figura 4 a). con la cual se realizaron arrastres verticales desde los 20 metros de profundidad, hasta obtener una muestra de 500 ml de agua filtrada que fue depositada en frascos plásticos. En total se recolectaron 96 muestras cuantitativas entre el periodo julio 2017 y junio 2018.

Para el análisis cuantitativo se tomaron tres muestras de 500 ml por punto de muestreo una muestra superficial, de 10 metros y a 20 metros de profundidad. Las muestras superficiales fueron tomadas directamente con el frasco de 500 ml, mientras que las muestras de profundidad se tomaron con una botella Van Dorn de 5 litros (Figura 4 b y c). Tanto las muestras cualitativas como las cuantitativas se guardaron dentro de una hielera y se transportaron al Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de El Salvador. Las muestras cuantitativas se fijaron inmediatamente con solución de Lugol a razón de 0.5 ml por 100 ml de muestra y se guardaron protegidas de la luz en un lugar a temperatura ambiente; las muestras cualitativas se analizaron sin preservar (Reguera et al 2011, UNESCO 2009).



Figura 4. Imágenes de muestreo de la comunidad fitoplanctónica a) toma de muestra cualitativa b y c). Tomada de muestra cuantitativa en El Lago de Coatepeque.

4.3 Fase de laboratorio

4.3.1 Análisis cualitativo de las muestras

Para el análisis de cada una de las muestras se procedió a homogeneizarlas, proceso que consistió en tomar la muestra y agitarla suavemente por cuatro minutos, una vez pasado este tiempo, se procedió a tomar 3 alícuota para colocar en una cámara Sedgewick-Rafter, se observaron en el microscopio óptico invertido (Axiovert 40 CFL con luz transmitida, campo claro y contraste de fase). Realizándose tres réplicas por cada muestra de la red. Para la identificación de dinoflagelados se utilizó un microscopio motorizado de epifluorescencia a través de la preparación de alícuotas de muestra en portaobjetos. La identificación de Diatomeas se realizó a través del microscopio electrónico de barrido (SEM) de la Universidad

Francisco Gavidia (UFG). Utilizando técnicas de limpieza y fijación de diatomeas. Para la identificación de algunas características morfológicas de las muestras se tomaron fotografías y se realizaron medidas celulares con el programa ZEISS ZEN Blue lite (Figura 5a).

Para la determinación taxonómica de las especies de fitoplancton se utilizaron diferentes claves y guías taxonómicas tales como las de Novelo (2014), Komárek *et al.* (2014) Soler *et al.* (2012), Botes (2003), Álvarez (2015), Vidal y Pérez (2009), Carmona *et al.* (2004), Wehr y Sheath (2003), Nezan *et al.* (1997), UNESCO (2009), Prescott (1984).

4.3.2 Análisis cuantitativo de las muestras

Durante el periodo de muestreo se analizó un total de 288 muestras. Los análisis se realizaron a través del método de Utermöhl, basado en la sedimentación de una alícuota de volumen conocido (5, 10, 25, 50, 100 ml) de una muestra de agua en una cámara de sedimentación (Reguera et al 2011). Debido a que la densidad de celular en la muestra del Lago de Coatepeque fue relativamente baja, siguiendo lo recomendado por Villafañe y Reíd (1995), las muestras se sedimentaron en cámaras de 25 ml por 24 horas (Figura 5 b y c y Anexo 1).

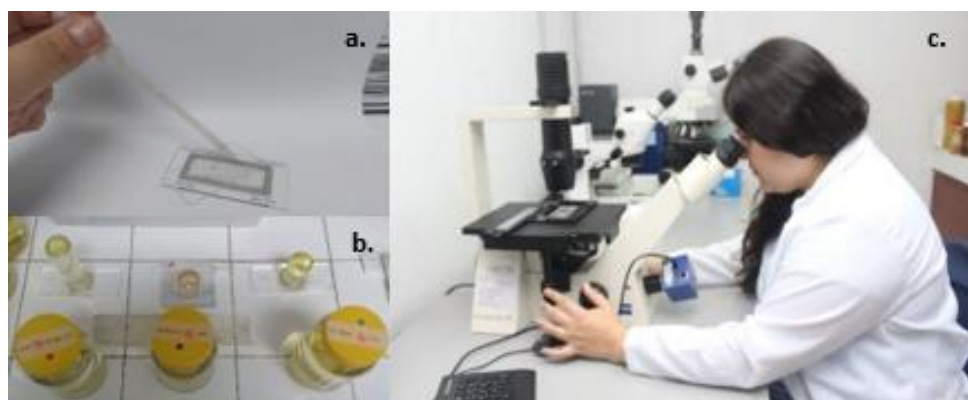


Figura 5. Imágenes de identificación y cuantificación de fitoplancton en El Lago de Coatepeque a). Uso de cámara de Sedgewick-Rafter para análisis cualitativo. b). Muestras para la sedimentación método de Utermöhl. c). Conteo celular al microscopio invertido.

- **Protocolo de conteo celular**

En el análisis preliminar de cada muestra sedimentada, se realizó un rápido barrido de la placa a pocos aumentos para hacerse una idea de la densidad y distribución de las células; esto permitió determinar si las células estaban uniformemente distribuidas, se anotaron las especies grandes y pequeñas y se identificaron todos los organismos a nivel taxonómico más bajo posible.

El conteo celular se realizó a través de recuentos de cámara completa mediante desplazamientos horizontales de izquierda a derecha y de derecha a izquierda (Figura 6) (Reguera et al 2011). Aquellos objetos que estuvieron encima de la línea superior del transecto se incluyeron en el recuento, pero no aquellos que se encuentran atravesados en la línea inferior ya que se contaron al realizar el siguiente transecto (Quintanilla 2017). En este recuento no se incluyeron células vacías, pequeños flagelados heterótrofos e incoloros y el picoplancton. Las especies de menor tamaño se contaron a un mayor aumento mientras que las de mayor tamaño se contaron a un menor aumento.

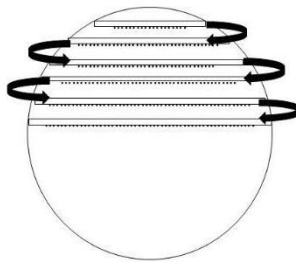


Figura 6. Recuento celular por transectos en cámara completa de Utermöhl. Fuente: Reguera et al 2011.

- **Cálculo de la abundancia celular**

La abundancia celular se expresó en células por mL (concentración celular por unidad de volumen de la muestra) y de acuerdo con Villafañe y Reid (1995), se calculó mediante las siguientes fórmulas:

Ecuación 1.

$$C = \frac{N}{V_b}$$

Ecuación 2.

$$V_b = \frac{A_b \times V}{A_1}$$

Donde:

N: número de células.

V_b: volumen barrido en ml (volumen sedimentado).

V: volumen de muestra en ml.

A_t: área total de la cámara de conteo.

A_b: área barrida (obtenida a partir de la medición del micrómetro).

C: la concentración de la célula 1 ml.

4.4 Análisis de datos

Los datos obtenidos en este estudio fueron sometidos a diferentes técnicas de análisis que permitieron estimar la riqueza, diversidad biológica y estructura de la comunidad fitoplanctónica. En el que se usaron los programas PRIMER 6.0 y PAST 4.0.

4.4.1. Análisis de riqueza

La riqueza de especies de la comunidad de fitoplancton para el lago de Coatepeque se expresó como número total de especies encontradas. Además, se utilizaron estimadores de riqueza no paramétricos para evaluar el sesgo o exactitud del inventario por medio de la comparación de la riqueza estimada con la riqueza verdadera o total (Gotelli y Colwell 2011). Los estimadores de riqueza se calcularon a partir de datos de presencia/ausencia de las especies detectadas en el muestreo. Los modelos implementados en este estudio corresponden a Chao 2, basado en la incidencia de especies y Jackknife de primer y segundo orden, basados en el remuestreo de especies (López y Williams 2006).

- **Chao 2**

Estima el número de especies esperadas tomando en consideración la relación que existe entre el número de especies representadas por individuo y el número de especies representada (Moreno 2001)

$$Chao_2 = S + \frac{L^2}{2M}$$

Donde:

L: número de especies que ocurren solamente en una muestra (especies “únicas”).

M: número de especies que ocurren en exactamente dos muestras.

S: número de especies en las muestras.

- **Jacknife de primer orden**

Este estimador considera el número de especies que ocurre solamente en una muestra del estudio. Es una técnica para reducir el sesgo de los valores estimados, en este caso para reducir la subestimación del verdadero número de especies en una comunidad con base en el número representado en una muestra (Moreno 2001).

$$Jack\ 1 = S + L \frac{-1}{m}$$

Donde: **L**: número de especies que ocurren solamente en una muestra (especies “únicas”).
m: número de muestras.
S: número de especies en las muestras.

- **Jacknife de segundo orden**

Se basa en el número de especies que ocurren solamente en una muestra, así como en el número de especies que ocurren en exactamente dos muestras (Moreno 2001).

Jacknife 2:

$$Jack\ 2 = S + \frac{L(2m - 3)}{m} - \frac{M(m - 2)^2}{m(m - 1)}$$

Donde: **L**: número de especies que ocurren solamente en una muestra (especies “únicas”).
m: número de muestras.
M: número de especies que ocurren en exactamente dos muestras.
S: número de especies en las muestras.

4.4.2 Análisis de diversidad

Los análisis de diversidad se obtuvieron a partir de los datos de abundancia de las especies identificadas y se calcularon a través de los índices de diversidad biológica descritos a continuación.

- **Índice de Shannon-Wiener**

Expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra. Es un índice para medir la equidad, el cual asume que todas las especies están representadas en las muestras (Álvarez *et al.* 2006). Este índice se representa normalmente como H' y se expresa con un número positivo, en un sistema natural el valor variará entre los 0.5 a 5. Se considerará sistema normal entre los 2 y 3. Los valores inferiores se consideran con baja diversidad y los valores superiores con alta diversidad de especies (Moreno 2001).

$$H = -1 \sum_{i=1}^S p_i * \ln(p_i)$$

Dónde S : número de especies.

P_i : proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos.

N_i : número de individuos de la especie i .

N : número de todos los individuos de todas las especies.

Para corregir el sesgo del tamaño de muestras para el índice de Shannon-Wiener se implementó un análisis de rarefacción; método que permite hacer comparaciones de números de especies entre comunidades cuando el tamaño de las muestras no es igual, estima a la riqueza de especies en función del tamaño de muestra más pequeño (Ramírez 1999, Gotelli y Entsminger 2001).

$$E(S) = \sum_{i=1}^S \left[1 - \frac{(N - N_i)/n}{N/n} \right]$$

Donde:

$E(S)$: número esperado de especies.

N : número total de individuos en la muestra.

N_i : número de individuos de la i ésima especie.

n : tamaño de la muestra estandarizado.

- **Índice de dominancia de Simpson**

Es un índice que cuenta las especies que tienen mayor representatividad, sin tomar en cuenta las demás; muestra la probabilidad de que dos individuos que se saquen al azar de una muestra correspondan a una misma especie (Álvarez *et al.* 2006, Bouza y Covarrubias 2005). Este índice varía inversamente con la heterogeneidad; por ejemplo, los valores del índice decrecen o aumentan según aumenta o decrece la diversidad. El valor de D se encuentra acotado entre 0 y s, tiende a cero en comunidades poco diversas, y es igual a la riqueza específica (s) en comunidades de máxima equitatividad (Moreno 2001).

$$D = \sum \left(\frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \right)$$

Donde:

n_i: número de individuos de especie *i*.
N: número total de individuos.

4.4.3 Análisis de la estructura

El Análisis de la estructura de la comunidad fitoplanctónica se calculó a partir de la abundancia y número de especies; mediante la transformación de los datos a raíz cuarta y la aplicación del Índice de Bray-Curtis que se considera como una medida de la diferencia entre las abundancias de cada taxón presente e ignora los casos en los cuales el taxón está ausente en ambas muestras (Brower y Zar, 1984), y se expresa de la siguiente forma:

$$I_{BC} = 1 - \frac{\sum(x_i - y_i)}{\sum(x_i + y_i)}$$

Donde:

x_i = abundancia o densidad de especies
i en un conjunto 1
y_i = abundancia de las especies en el otro.

Las variaciones espaciales y temporales se exploraron a través de un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) que es una técnica multivariante de interdependencia que trata de representar en un espacio geométrico de pocas dimensiones a las proximidades existentes entre un conjunto de objetos (Clarke y Gorley 2006). Método adecuado para datos que no son normales o que están en una escala discontinua o arbitraria y presentan una ventaja frente a otras técnicas debido a que el modelo no presupone una relación lineal entre las proximidades y las distancias, sino que establece una relación monótona creciente entre ambas (Guerrero y Ramírez 2012).

Para verificar las H^0 de que no existen diferencias en la abundancia y composición en la comunidad fitoplanctónica en distintas profundidades, puntos de muestreo y épocas del año. Se efectuaron Análisis de Similitud (ANOSIM); prueba no paramétrica que se utiliza normalmente para datos de taxones en muestras, donde se deben comparar grupos de muestras (Clarke y Gorley 2006). El programa calcula el estadístico R; prueba restringida entre los valores -1 a 1, donde los números positivos sugieren más similitud dentro de los sitios y los valores cercanos a cero no representan ninguna diferencia entre las similitudes dentro de los sitios. Los valores de R negativos sugieren más similitud entre los sitios (Legendre y Gallagher 2001).

Adicionalmente, para conocer el porcentaje de contribución de las especies de fitoplancton a la similitud entre la época seca y lluviosa se calculó y analizó el porcentaje de similitud SIMPER prueba estadística que permite conocer la contribución de cada especie a la similitud observada entre cada muestra (Clarke y Gorley 2006).

La estructura de la comunidad fitoplanctónica también se analizó a partir del uso de la clave de clasificación de grupos morfo-funcionales para fitoplancton de agua continental propuesta por Kruk *et al.* (2010) (Figura 7). Las variaciones espaciales y temporales de estos grupos en Lago de Coatepeque se exploraron a través de un NMDS mediante la transformación de los datos a raíz cuarta y la aplicación del Índice de Bray-Curtis. Adicionalmente, se efectuaron Análisis ANOSIM y SIMPER.

1. Presencia de flagelos	2 Presencia de estructura silíceas	Grupo II			
	2' Ausencia de estructuras silíceas	3 MLD < 2µm	Grupo I		
		3' MLD > 2µm	Grupo V		
1' Ausencia de flagelos	2 Presencia de estructura silíceas	Grupo VI			
	2' Ausencia de estructuras silíceas	3 Presencia de mucílago	4 Presencia de aerotopos	5 S/V < 0.6 µm ⁻¹	Grupo III
				5' S/V > 0.6 µm ⁻¹	Grupo VII
			4' Ausencia de aerotopos	V < 10 µm ³	Grupo I
		V > 10 µm ³		Grupo VII	
		3' Ausencia de mucílago	4 V < 30 µm ³	MDL < 20 µm ³	Grupo I
				MDL > 20 µm ³	Grupo IV
	4' V > 30 µm ³		5 Presencia de aerotopos	Grupo III	
		5' Ausencia de aerotopos	Grupo IV		

Figura 7. Clave para la clasificación de los grupos morfo-funcionales, traducido de Kruk *et al.* (2010).

4.5 Análisis de la relación de la estructura con las variables físico-químicas

De acuerdo a los valores obtenidos se elaboraron los perfiles de temperatura, valores promedio de pH mensuales, valores promedio de Sólidos disueltos totales, valores promedio de transparencia. Para la determinar el conjunto de variables físico-químicas que más contribuyen y explican la variabilidad espacio-temporal de la comunidad fitoplanctónica se realizó el Análisis de BIO-ENV que consiste calcula una serie de coeficientes de correlación entre la matriz de similaridad biótica creada en la ordenación y las matrices ambientales derivadas de la combinación secuencial de las variables medidas, usando la correlación armónica de Spearman. El coeficiente máximo obtenido de todas las posibles combinaciones, indica que ésa es la que ‘mejor explica’ el esquema biológico obtenido en el ordenamiento y clasificación (Clarke y Ainsworth 1993).

V. RESULTADOS

5.1 Composición de especies de fitoplancton

Se identificaron un total de 99 especies correspondientes a 6 divisiones, 12 clases, 29 órdenes, 43 familias, 67 géneros. Del total de especies, el 41% pertenece a la división Bacillariophyta, el 36% a Cyanobacteria, el 17% a Chlorophyta, el 3% a Charophyta, el 2% a Miozoa y el 1% a Euglenozoa (Figura 8). Las especies más frecuentes durante el periodo de muestreo corresponden a *Gloeocapsa sp.*, *Oocystis solitaria*, *Heterocapsa sp.*, *Limnoraphis cf. birgei*, *Microcystis cf. aeruginosa*, *Cyclotella sp.*, *Aphanocapsa cf. delicatissima*, *Raphidiopsis sp.*, *Microcystis cf. wesenbergii*, *Epithemia sp.* representando el 71% de la frecuencia total de las especies registradas. A continuación, se presenta el listado sistemático de las especies por cada una de las divisiones registradas.

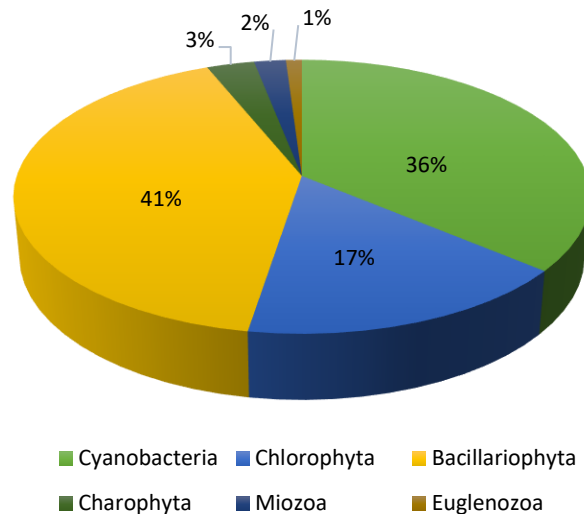


Figura 8. Porcentaje de especies por División encontradas en el Lago de Coatepeque.

5.1.1 Bacillariophyta

De esta división se registró un total de 41 especies pertenecientes a 22 géneros, 16 familias, 14 órdenes y 5 clases de las cuales 6 especies fueron descritas solamente a nivel de clase y orden (Tabla 2) (Figuras 9,10 ,11 y 12).

Tabla 2. Lista de especies de la División Bacillariophyta según clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).

Clase	Orden	Familia	Genero	Especie	Autoridad
Mediophyceae	Anaulales	Anaulaceae	<i>Terpsinoë</i>	<i>sp. 1</i>	Ehrenberg, 1843.
			<i>Terpsinoë</i>	<i>sp. 2</i>	Ehrenberg, 1843.
			<i>Terpsinoë</i>	<i>cf. muninensis</i>	Tuji, 2018.
Bacillariophyceae	Bacillariales	---	---	<i>sp. 2</i>	---
		Bacillariaceae	<i>Nitzschia</i>	<i>sp. 1</i>	Hassall, 1845.
			<i>Nitzschia</i>	<i>sp. 2</i>	Hassall, 1845.
	<i>Nitzschia</i>		<i>sp. 3</i>	Hassall, 1845.	
	Cocconeidales	Cocconeidaceae	<i>Cocconeis</i>	<i>cf. euglypta</i>	Ehrenberg, 1854
			<i>Cocconeis</i>	<i>cf. lineata</i>	Ehrenberg, 1849
			<i>Cocconeis</i>	<i>sp.</i>	Ehrenberg, 1836.
		Achnanthidiaceae	<i>Achnanthes</i>	<i>sp.</i>	(Brébisson ex W. Smith) Grunow in Cleve & Grunow, 1880.
			<i>Achnantheidium</i>	<i>sp.</i>	Kützing, 1844.
	---	---	<i>sp. 6</i>	---	
	Cymbellales	Gomphonemataceae	<i>Gomphonema</i>	<i>sp.</i>	Ehrenberg, 1832.
		Cymbellaceae	<i>Cymbella</i>	<i>sp.</i>	C. Agardh, 1830.
	Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Eunotia</i>	<i>sp.</i>	Ehrenberg, 1837.
	Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Synedra</i>	<i>sp.</i>	Ehrenberg, 1830

			<i>Fragilaria</i>	<i>sp. 1</i>	Lyngbye, 1819.
			<i>Fragilaria</i>	<i>sp. 2</i>	Lyngbye, 1819.
			<i>Fragilaria</i>	<i>sp. 3</i>	Lyngbye, 1819.
			<i>Fragilaria</i>	<i>sp. 4.</i>	Lyngbye, 1819.
	Naviculales	---	---	<i>sp. 1</i>	---
		Naviculaceae	<i>Gyrosigma</i>	<i>sp. 1</i>	Hassall, 1845.
			<i>Gyrosigma</i>	<i>sp. 2</i>	Hassall, 1845.
			<i>Navicula</i>	<i>sp.</i>	Bory, 1822.
		---	---	<i>sp. 4</i>	---
		Sellaphoraceae	<i>Sellaphora</i>	<i>cf. saugerresii</i>	(Desmazières) C.E. Wetzel & D.G. Mann 2015.
	Rhopalodiales	---	---	<i>sp. 3</i>	---
		Rhopalodiaceae	<i>Rhopalodia</i>	<i>sp.</i>	Krammer, 1988.
			<i>Epithemia</i>	<i>sp.</i>	Kützing, 1844.
			<i>Epithemia</i>	<i>cf. turgida</i>	(Ehrenb.) Kütz. 1844.
	Thalassiophysales	Catenulaceae	<i>Amphora</i>	<i>sp.</i>	Ehrenberg ex Kützing, 1844.
	Surirellales	Surirellaceae	<i>Surirella</i>	<i>sp.</i>	Turpin, 1828.
Mediophyceae	Thalassiosirales	Thalassiosiraceae	<i>Thalassiosira</i>	<i>sp.</i>	Cleve, 1873.
	Stephanodiscales	Stephanodiscaceae	<i>Stephanodiscus</i>	<i>sp.</i>	Ehrenberg, 1845.

			<i>Cyclotella</i>	<i>cf. atomus</i>	Hustedt, 1937.
			<i>Cyclotella</i>	<i>cf. meneghiniana</i>	Kützing, 1844.
			<i>Cyclotella</i>	<i>cf. Quillensis</i>	L.W. Bailey 1922.
			<i>Cyclotella</i>	<i>sp.</i>	(Kützing) Brébisson, 1838.
Coscinodiscophyceae	Aulacoseirales	Aulacoseiraceae	<i>Aulacoseira</i>	<i>sp.</i>	Thwaites, 1848.
	Stephanopyxales	---	---	<i>sp. 5</i>	---

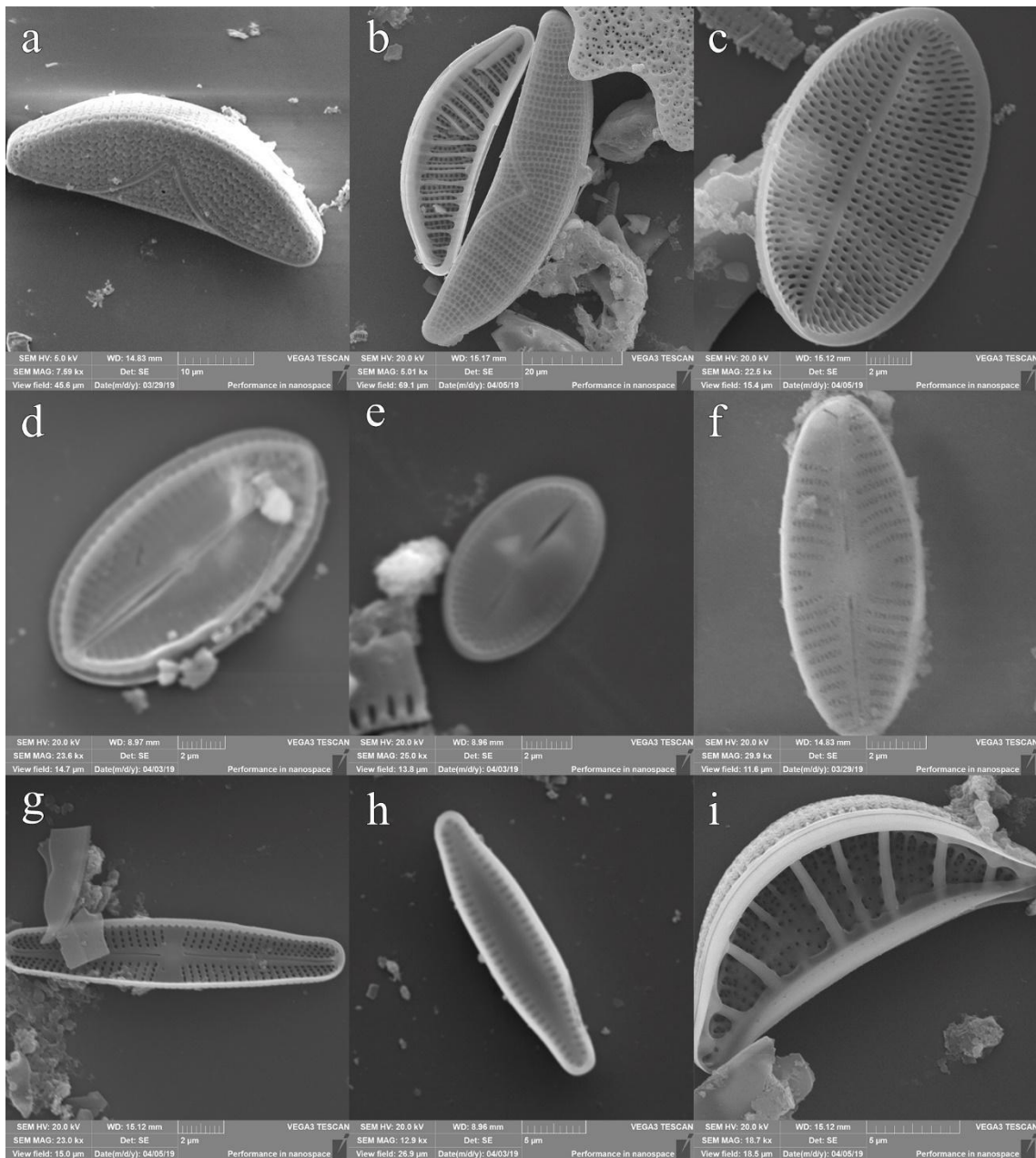


Figura 9. Especies de la División *Bacillariophyta* a), *Epithemia* sp., b), *Epithemia* cf. *turgida*, c), *Cocconeis* cf. *lineata*, d), *Cocconeis* cf. *euglypta*, e), *Cocconeis* sp., f), *Sellaphora* cf. *Saugerresi*, g), *Achnantheidium* sp, h), *Fragilaria* sp.4., i), *Rhopalodia* sp.

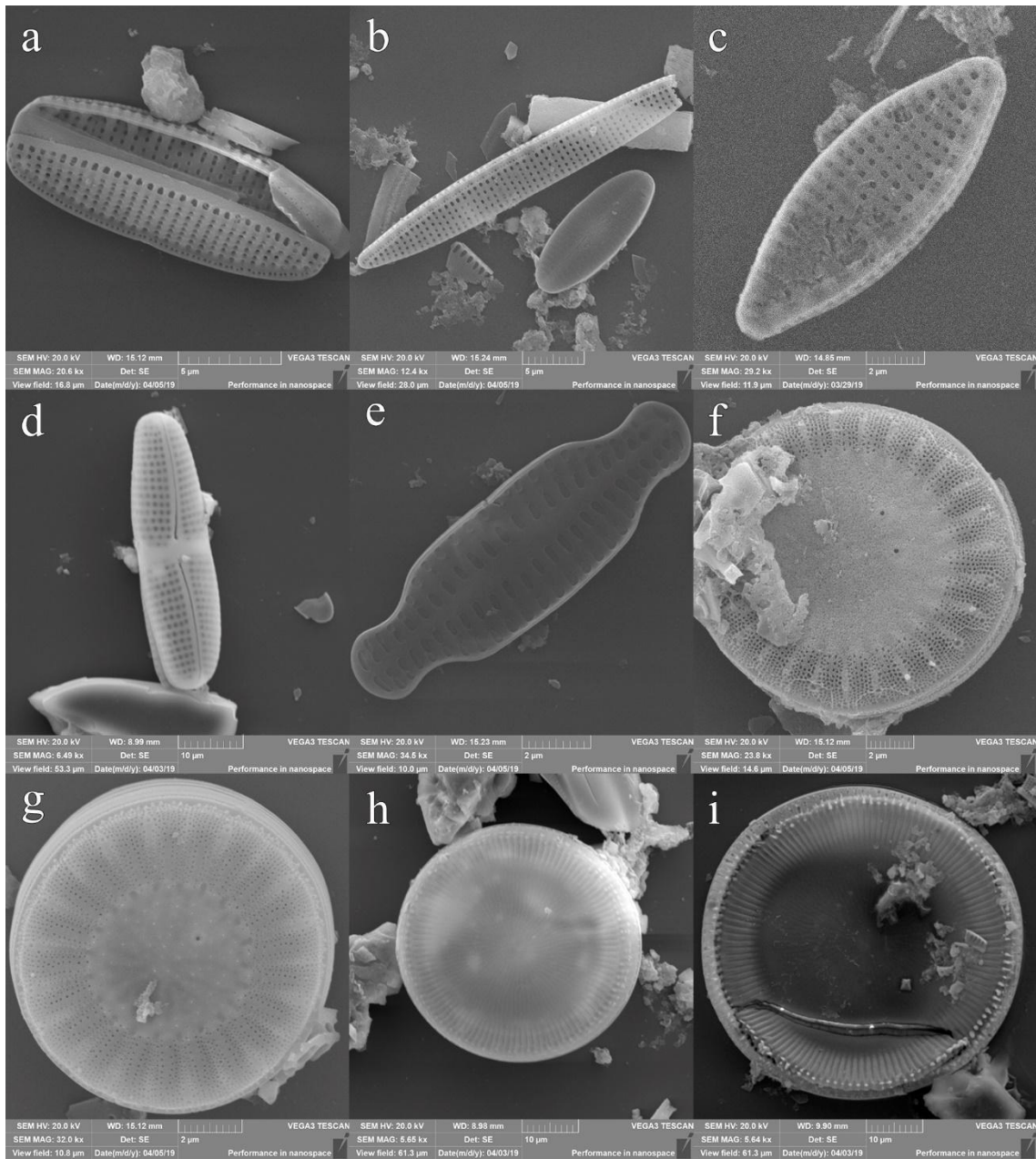


Figura 10. Especies del phylum Bacillariophyta encontradas en Lago de Coatepeque julio 2017- julio 2018. a), *Nitzschia sp. 1.*, b), *Nitzschia sp. 2.*, c), *Nitzschia sp. 3.*, d), *Achnanthes sp.*, e), Bacillariophyta pennada sp.6., f), *Cyclotella cf. atomus*, g), *Cyclotella cf. meneghiniana*, h y i), *Cyclotella cf. quillensis*.

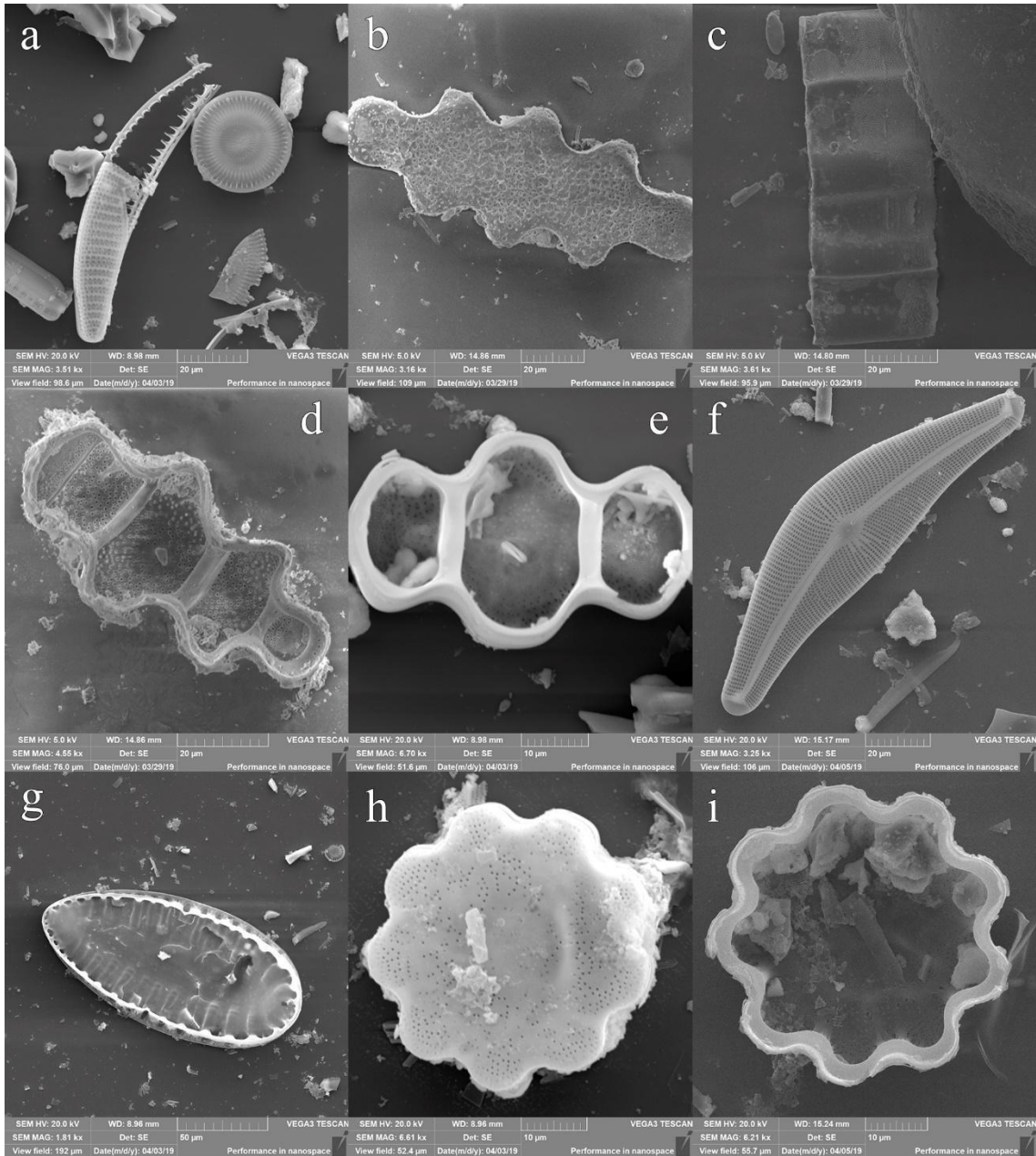


Figura 11. Especies de la División Bacillariophyta a), *Cyclotella* sp., b y c), *Terpsinoë* cf. *muninensis*, d), *Terpsinoë* sp.1., e), *Terpsinoë* sp.2., f), *Cymbella* sp., g), *Surirella* sp., h y i), Bacillariophyta pennada sp.5.

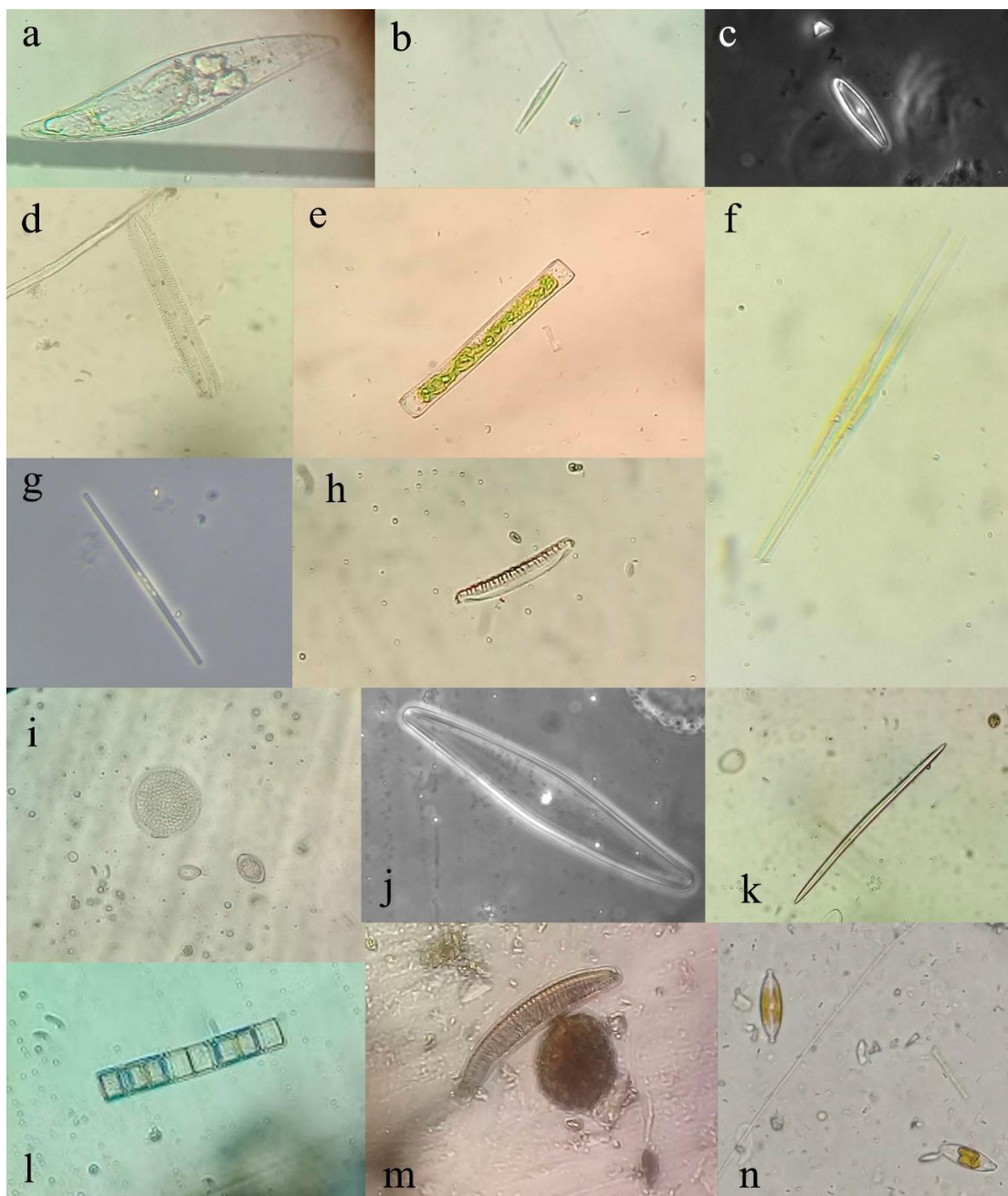


Figura 12. Especies de la División Bacillariophyta a), *Gyrosigma* sp 1., b), *Fragilaria* sp 4., c), *Gomphonema* sp., d), Bacillariophyta pennada sp. 2., e), Bacillariophyta pennada sp. 4., f), *Fragilaria* sp. 2., g), *Fragilaria* sp. 3., h), Bacillariophyta pennada sp. 2., i), *Thalassiosira* sp., j), *Gyrosigma* sp. 2., k), *Synedra* sp., l), *Aulacoseira* sp., m), *Eunotia* sp., n), *Navicula* sp.

5.1.2 Cianobacterias

Para este phylum se identificó un total de 35 especies pertenecientes a 25 géneros, 13 familias y 5 órdenes (Tabla 3) (Figura 13 y 14).

Tabla 3. Lista de especies de cianobacterias según clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).

Clase	Orden	Familia	Género	Especie	Autoridad
Cyanophyceae	Chroococcales	Aphanothecaceae	<i>Aphanothece</i>	<i>sp.</i>	C.Nägeli, 1849.
		Chroococcaceae	<i>Chroococcus</i>	<i>cf. turgidus</i>	(Kützing) Nägeli, 1849.
			<i>Chroococcus</i>	<i>sp.</i>	Nägeli, 1849.
		Gomphosphaeriaceae	<i>Gomphosphaeria</i>	<i>sp.</i>	Kützing, 1836.
		Microcystaceae	<i>Gloeocapsa</i>	<i>cf. gelatinosa</i>	Kützing 1843.
			<i>Gloeocapsa</i>	<i>sp.</i>	Kützing, 1843.
			<i>Microcystis</i>	<i>sp.</i>	Lemmermann, 1907.
			<i>Microcystis</i>	<i>cf. aeruginosa</i>	(Kützing) Kützing.
			<i>Microcystis</i>	<i>cf. wesenbergii</i>	(Komárek) Komárek ex Komárek 2006.
			<i>Radiocystis</i>	<i>sp.</i>	H. Skuja, 1948.
	Nostocales		Aphanizomenonaceae	<i>Raphidiopsis</i>	<i>cf. mediterranea</i>
		<i>Cylindrospermopsis</i>		<i>sp.</i>	G. Seenayya & N. Subba Raju, 1972.
		<i>Dolichospermum</i>		<i>sp.</i>	(Brébisson ex Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann y J. Komárek.
	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Limnoraphis</i>	<i>cf. birgei</i>	(G.M. Smith) J. Komárek, E. Zapomelová, J. Smarda, J. Kopecký, E. Rejmánková, J. Woodhouse, B.A. Neilan & J. Komárková 2013.
			<i>Oscillaoria</i>	<i>sp.</i>	Kützing ex Gomont 1892.
			<i>Oscillaoria</i>	<i>cf. boryana</i>	F. kuibyshevjensis Poljansky 1950.
		Microcoleaceae	<i>Planktothrix</i>	<i>sp.</i>	K. Anagnostidis J. Komárek, 1988.
		Homoeotrichaceae	<i>Homoeotrix</i>	<i>sp.</i>	(Thuret ex Bornet & Flahault) Kirchner, 1898.
	Spirulinales	Spirulinaceae	<i>Spirulina</i>	<i>sp.</i>	Turpin ex Gomont, 1892.
	Synechococcales	Coelosphaeriaceae	<i>Coelomoron</i>	<i>sp.</i>	H.F. Buell, 1938.
		Merismopediaceae	<i>Aphanocapsa</i>	<i>cf. delicatissima</i>	West & G.S. West 1912.

			<i>Aphanocapsa</i>	<i>cf. annulata</i>	G.B. Mc Gregor 2007.
			<i>Aphanocapsa</i>	<i>sp. 1</i>	C. Nägeli, 1849.
			<i>Aphanocapsa</i>	<i>sp. 2</i>	C. Nägeli, 1849.
			<i>Synechocystis</i>	<i>sp.</i>	C. Sauvageau, 1892
			<i>Cyanobium</i>	<i>sp.</i>	R. Rippka & G. Cohen-Bazire, 1983.
			<i>Merismopedia</i>	<i>sp.</i>	F. E. Clements & H.L. Shantz, 1909.
		Pseudanabaenaceae	<i>Komvophoron</i>	<i>sp.</i>	Lauterborn, 1915
			<i>Pseudanabaena</i>	<i>sp. 1</i>	Lauterborn, 1915
			<i>Pseudanabaena</i>	<i>sp. 2</i>	Lauterborn, 1915
			<i>Pseudanabaena</i>	<i>sp. 2</i>	Lauterborn, 1915
			<i>Pseudanabaena</i>	<i>sp.2</i>	Lauterborn, 1915
		Synechococcaceae	<i>Synechococcus</i>	<i>sp.</i>	C.Nägeli, 1849
			<i>Eucapsis</i>	<i>sp.</i>	F. E. Clements & H.L. Shantz, 1909.
		---	---	<i>sp. 1</i>	---

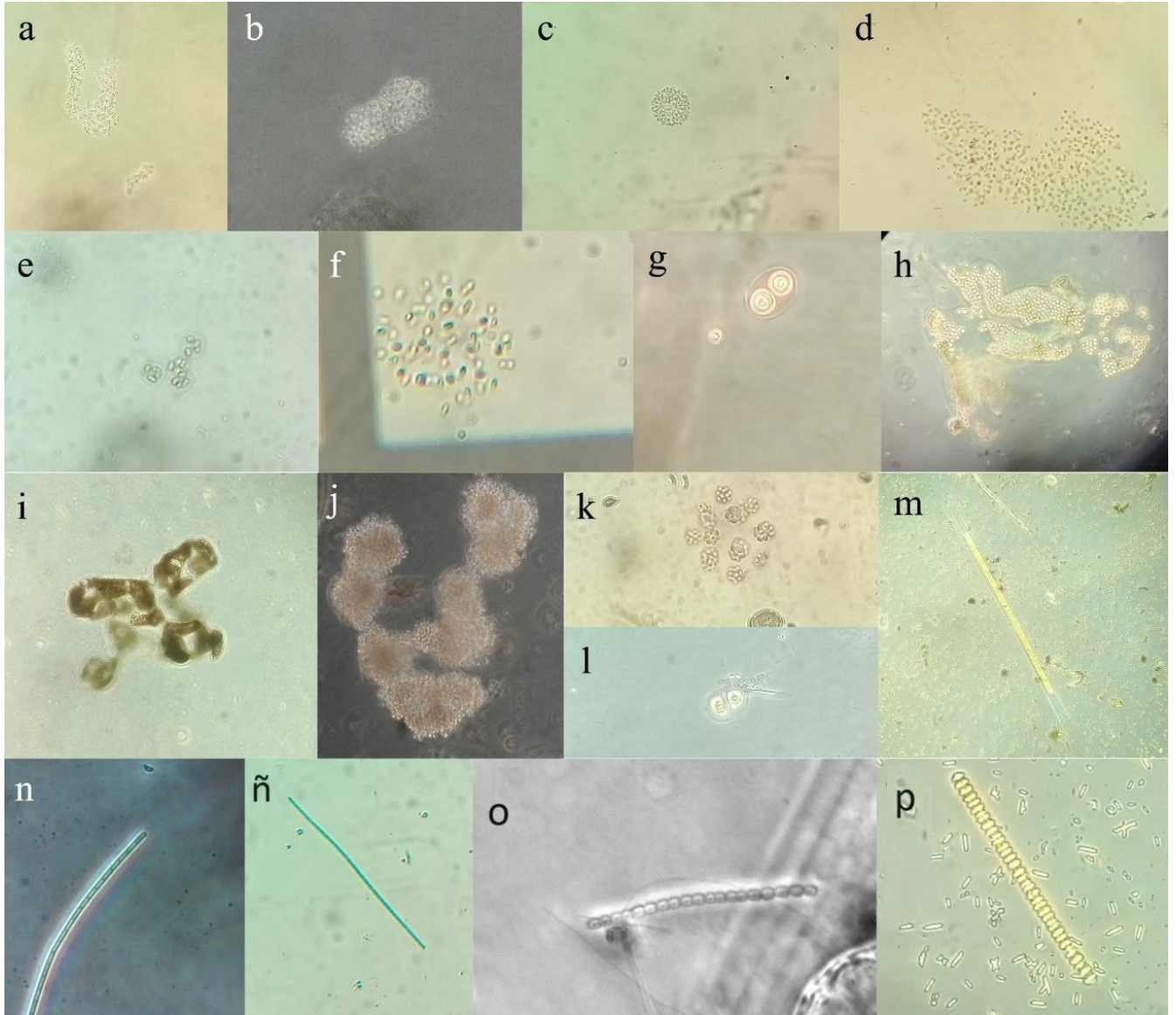


Figura 13. Especies de la División Cyanophyta. a), *Aphanocapsa* sp. 1., b), *Aphanocapsa* sp. 2., c), *Aphanocapsa* cf. *Annulata*, d), *Aphanocapsa* cf. *delicatissima*., e), *Gloeocapsa* cf. *gelatinosa*, f), *Aphanothece* sp., g), *Gloeocapsa* sp., h), *Microcystis* cf. *wesenbergii*, i), *Microcystis* cf. *aeruginosa*, j), *Microcystis* sp., k), *Gomphosphaeria* sp., l), *Chroococcus* cf. *turgidus* m), *Limnoraphis* cf. *birgei*, j), n), *Pseudanabaena* sp. 1, ñ), *Pseudanabaena* sp. 2, o), *Pseudanabaena* sp. 3, p), *Oscillatoria* cf. *boryana*.

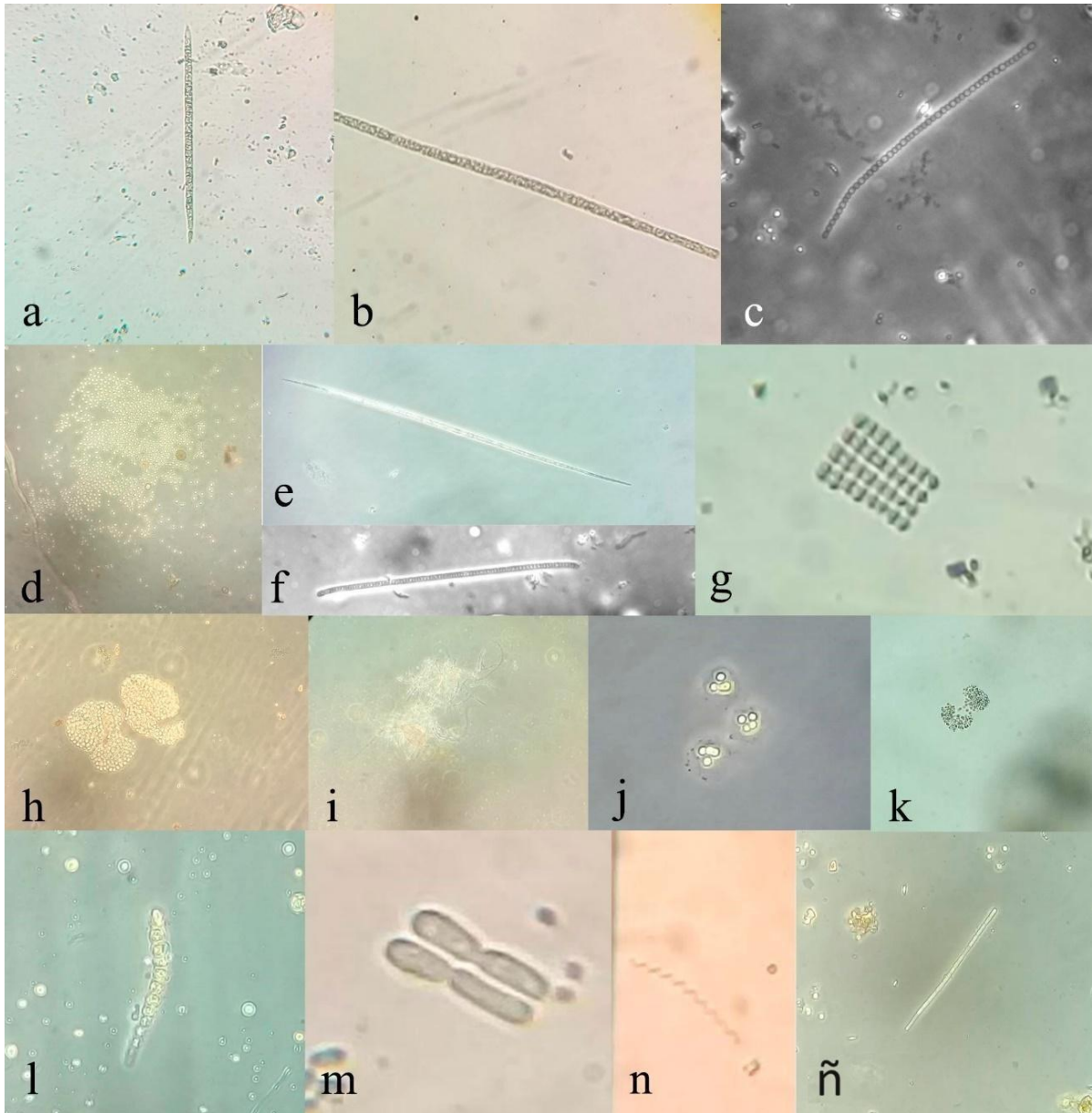


Figura 14. Especies del phylum Cyanophyta encontradas en Lago de Coatepeque julio 2017- junio 2018.

a), *Cylindrospermopsis* sp., b), *Planktothrix* sp., c), *Komvophoron* sp., d), *Synechocystis* sp., e), *Raphidiopsis* cf. *mediterranea*., f), *Oscillatoria* sp., g), *Merismopedia* sp., h), *Coelomoron* sp., i), Cyanophyta sp., j), *Eucapsis* sp., k), *Aphanocapsa* cf. *Annulata*, l), *Homoeothrix* sp. m), *Synechococcus* sp., n), *Spirulina* sp., ñ), *Pseudanabaena* sp.3.,

5.1.3 Chlorophyta

Se identificó un total de 17 especies pertenecientes a 14 géneros, 9 familias, 5 órdenes, una clase y dos especies se describieron a nivel de división (Tabla 4) (Figura 15).

Tabla 4. Lista de especies de chlorophyta encontradas clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).

Clase	Orden	Familia	Género	Especie	Autoridad
<i>Trebouxiophyceae</i>	Chlorellales	Chlorellaceae	<i>Chlorella</i>	<i>sp.</i>	Beyerinck [Beijerinck], 1890.
		Oocystaceae	<i>Oocystis</i>	<i>cf. solitaria</i>	Wittrock, 1879.
			<i>Oocystis</i>	<i>cf. lacustris.</i>	Chodat, 1897.
Chlorellaceae	<i>Actinastrum</i>	<i>sp.</i>	Lagerheim, 1882.		
<i>Ulvophyceae</i>	Cladophorales	Cladophoraceae	<i>Rhizoclonium</i>	<i>sp.</i>	(C. Agardh) Kützing, 1845.
<i>Chlorophyceae</i>	Sphaeropleales	Radiococcaceae	<i>Gloeocystis</i>	<i>sp.</i>	Nägeli, 1849.
		Hydrodictyaceae	<i>Pediastrum</i>	<i>sp.</i>	Meyen, 1829.
			<i>Tetraëdron</i>	<i>sp.</i>	Kützing, 1845.
			<i>Stauridium</i>	<i>sp.</i>	E. Hegewald en Buchheim et al. 2005.
		Scenedesmaceae	<i>Coelastrum</i>	<i>sp.</i>	Nägeli, 1849.
		Selenastraceae	<i>Monoraphidium</i>	<i>sp.</i>	Komárková-Legnerová, 1969.
	<i>Kirchneriella</i>		<i>sp.</i>	Schmidle, 1893.	
<i>Ankistrodesmus</i>	<i>sp.</i>		Corda, 1838.		
Chlamydomonadales	Volvocaceae	<i>Eudorina</i>	<i>cf. elegans</i>	Ehrenberg, 1832.	
<i>Trebouxiophyceae</i>	Trebouxiophyceae ordo incertae sedis	Trebouxiophyceae incertae sedis	<i>Crucigenia</i>	<i>sp.</i>	Morren, 1830.
---	---	---	---	<i>Sp. 1</i>	---
---	---	---	---	<i>Sp. 2</i>	---

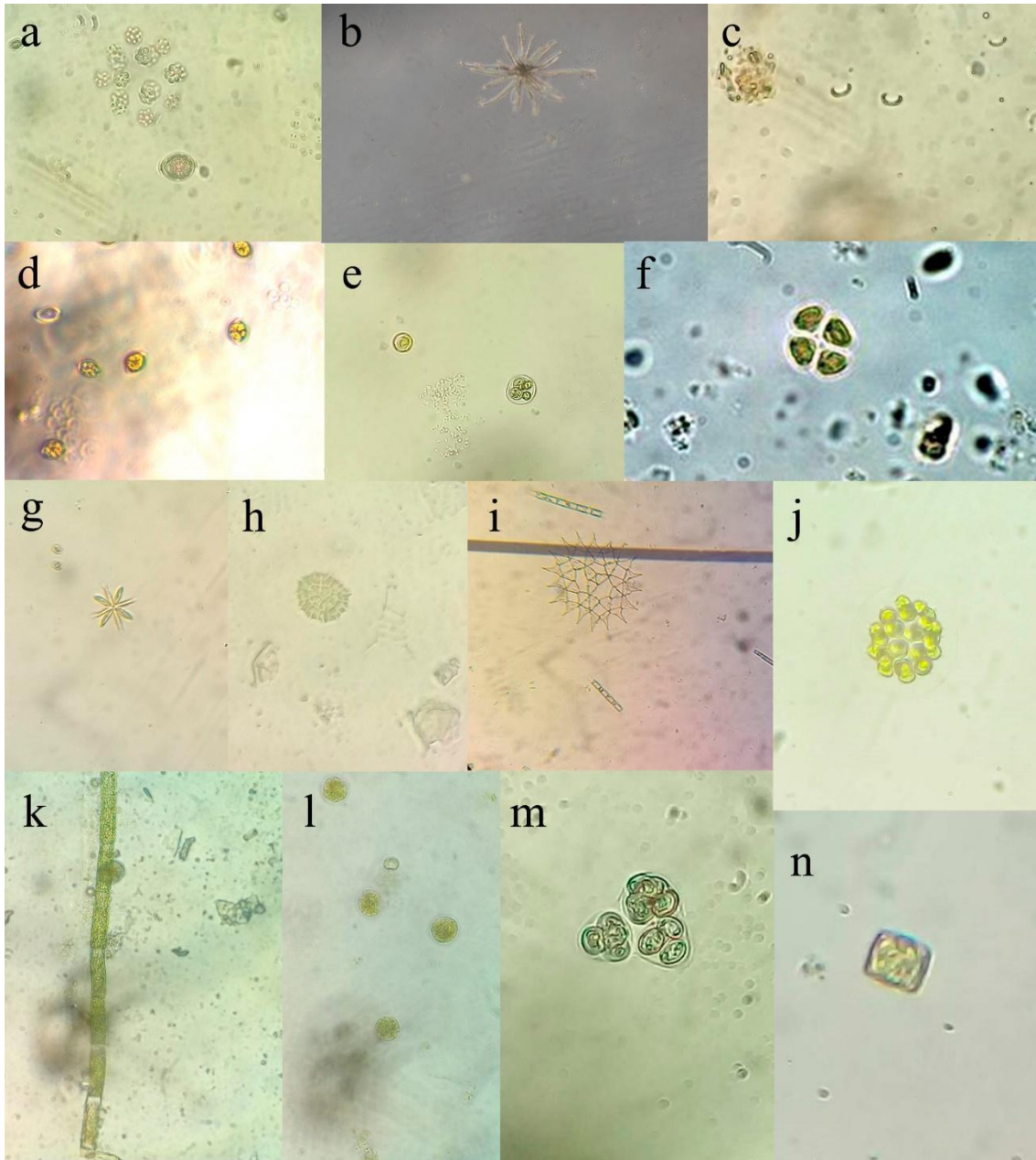


Figura 15. Especies de la División Chlorophyta a), *Coelastrum sp.*, b), *Ankistrodesmus sp.*, c), *Kirchneriella sp.*, d), *Oocystis cf. solitaria*, e), *Gloeocystis sp.* f), *Crucigenia sp.*, g), *Actinastrum sp.*, h), *Stauridium sp.*, i), *Pediastrum sp.*, j), *Eudorina cf. elegans*, k), *Rhizoclonium sp.*, l), *Chlorella sp.*, m), *Oocystis cf. lacustris*, n), *Tetraëdron sp.*

5.1.4 Charophyta

Para este phylum se identificó un total de 3 especies pertenecientes a 3 géneros, 2 familias y 2 órdenes (Tabla 5) (Figura 16).

Tabla 5. Lista de especies de chlorophyta clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).

Clase	Orden	Familia	Genero	Especie	Autoridad
Zygnematophyceae	Zygnematales	Zygnemataceae	<i>Spirogyra</i>	<i>sp.</i>	Link, 1820.
	Desmidiiales	Desmidiaceae	<i>Staurastrum</i>	<i>sp.</i>	Meyen ex Ralfs, 1848.
			<i>Actinotaenium</i>	<i>sp.</i>	(Nägeli) Teiling, 1954.

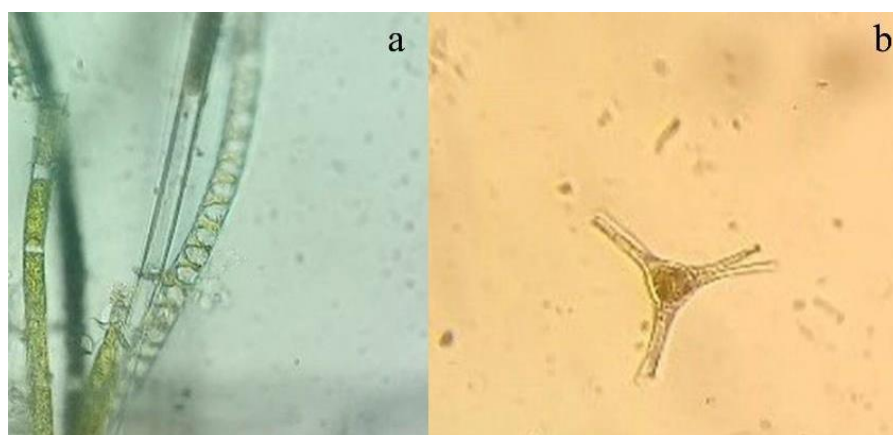


Figura 16. Especies de la División Charophyta a) *Spirogyra sp.*, b) *Staurastrum sp.*

5.1.5 Miozoa

Para este phylum se identificó un total de 2 especies pertenecientes a 2 géneros, 2 familias, 2 órdenes y una clase (Tabla 6) (Figura 17 a y b).

Tabla 6. Lista de especies del phylum Miozoa clasificación propuesta por Guiry y Guiry (2021).

Clase	Orden	Familia	Género	Especie	Autoridad
Dinophyceae	Peridinales	Heterocapsaceae	<i>Heterocapsa</i>	<i>sp.</i>	F. Stein, 1883.
	Gymnodiniales	Gymnodiniaceae	<i>Gymnodinium</i>	<i>sp.</i>	F. Stein, 1878.

5.1.6 Euglenozoa

Para este phylum se identificó una especie perteneciente a un género, una familia, un orden y una clase (Tabla 7) (Figura 17 c).

Tabla 7. Lista de especies de Euglenozoa clasificación propuesta por Guiry, M.D. & Guiry, 2021.

Clase	Orden	Familia	Género	Especie	Autoridad
Euglenophyceae	Euglenida	Euglenidae	<i>Euglena</i>	<i>sp.</i>	Ehrenberg, 1830

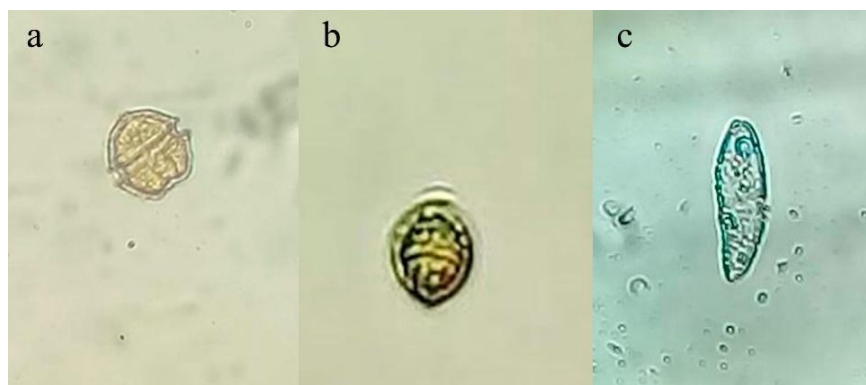


Figura 17. Especies de la División Miozoa a), *Gymnodinium sp.*, b), *Heterocapsa sp.*, y Euglenozoa c), *Euglena sp.*

5.2 Estimación de riqueza

De acuerdo a los valores obtenidos a través de la curva de acumulación y estimadores de riqueza se obtuvo una representación del 92 % de especies esperadas por Chao 2, el 90 % en Jackknife 1^o orden y el 88 % en Jackknife 2^o orden, obteniéndose valores de riqueza estimada cercanos a los valores de riqueza observada. A pesar de no obtenerse una asíntota definida, las curvas presentan pendientes suavizadas por lo que se considera que el muestreo es representativo de la diversidad potencial de la comunidad fitoplanctónica del lago. Por lo tanto, la probabilidad de añadir especies nuevas al inventario es poca por lo que por más que se agreguen muestras, la cantidad de especies nuevas de fitoplancton a identificar, será menor (Figura 18).

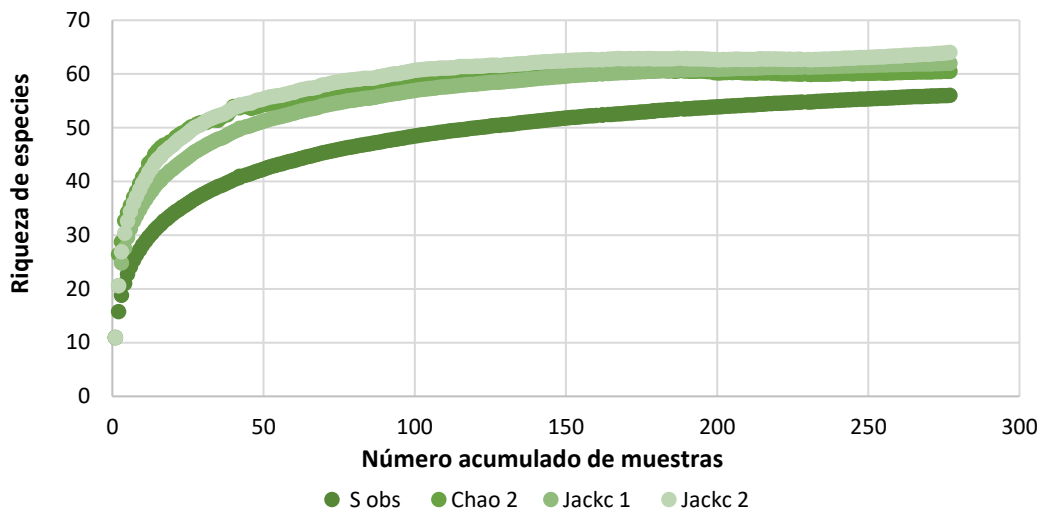


Figura 18. Curva de acumulación de especies y comparación de riqueza estimada para la comunidad de fitoplancton del Lago de Coatepeque a través de tres estimadores no paramétricos Chao 2, Jackknife 1 y Jackknife 2 S obs: Especies observadas.

5.3 Diversidad de especies de la comunidad de fitoplancton

5.3.1 Índice de diversidad de Shannon-Wiener e índice de dominancia de Simpson.

Los valores del índice de diversidad de Shannon-Wiener para la comunidad de fitoplancton oscilaron entre 0.1 y 1.9 bits ind⁻¹, con un promedio de 1.2 bits ind⁻¹ durante el periodo de muestreo. El índice de Simpson que mide tanto la dominancia como la riqueza obtuvo valores entre los 0.04 y 0.8 con un promedio de 0.5 (Figura 19 a y b).

Los meses con menor diversidad corresponden a mayo y junio con valores mínimos de 0.1 y 0.3 bits ind⁻¹, respectivamente (Figura 19 a); con respecto al índice de dominancia estos meses presentaron valores de 0.9 y 0.8 indicando una alta dominancia que se explica por la presencia de las especies *Limnorphis cf. birgei*, *Microcystis cf. aeruginosa*, El mes con mayor diversidad y menor variabilidad corresponde a noviembre 2017 con un valor

máximo 1. 2 bits ind⁻¹; mes para el cual el índice de Simpson presentó valores inferiores a 0.5 que confirma una dominancia baja de especies (Figura 19 b).

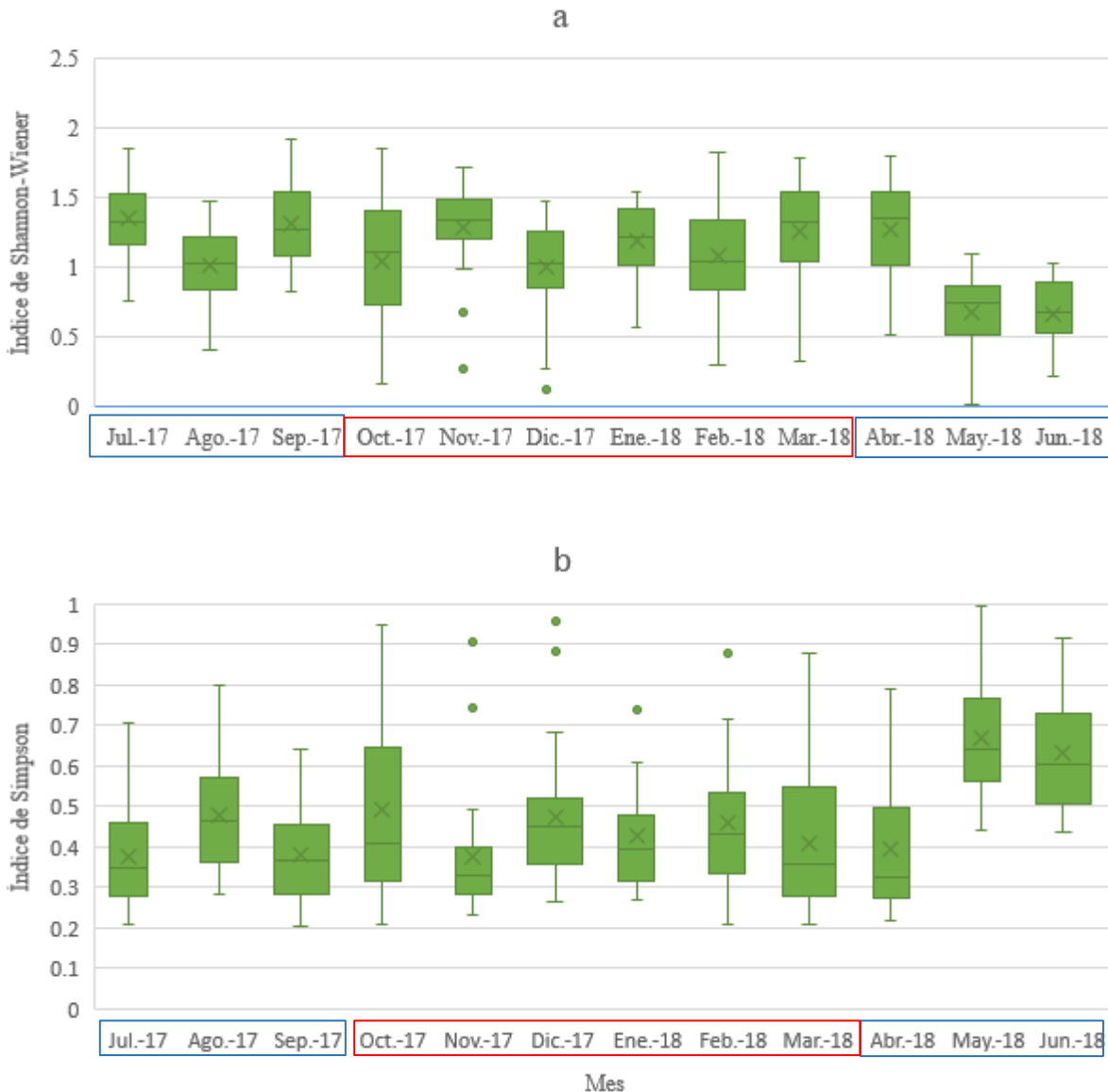


Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes. de los valores del índice del índice diversidad de Shannon-Wiener (a) e índice de Simpson (b). Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa. El ancho de la caja representa la distancia entre el primer y el tercer cuartil, la línea interior la mediana, la "x" Media aritmética y la barra vertical los valores máximos y mínimos de la varianza. Los puntos por fuera de la caja corresponden a valores atípicos o extremos.

Con respecto a la época seca y lluviosa la dispersión de los valores del índice Shannon-Wiener y el índice de Simpson son similares, por lo que no es posible afirmar que una época sea más diversa que otra. Sin embargo, es importante mencionar que durante la

época seca se presentan los valores atípicos de menor diversidad, estos corresponden a noviembre y diciembre con 0.6 y 0.1 bits ind⁻¹ respectivamente, además de un valor extremo para el mes de noviembre de 0.3 bits ind⁻¹ (Figura 19 a). En el caso del índice de Simpson los valores atípicos y extremos se observaron en los meses de noviembre y diciembre 2017; enero y febrero 2018 en todo caso producto de la dominancia de *Microcystis cf. aeruginosa*, *Limnoraphis cf. birgei*, *Microcystis cf. wesenbergii* y *Aphanocapsa cf. delicatissima* (Figura 19 b).

5.4 Abundancia de la comunidad fitoplanctónica.

Durante el periodo de muestreo la comunidad fitoplanctónica del lago presentó una abundancia promedio de 34,477 cél/L. Las especies con mayor abundancia promedio corresponden a *Microcystis cf. aeruginosa* con 171,839 cél/L, *Microcystis cf. wesenbergii* con 145,217 cél/L, *Cyanobium sp.* con 143,591 cél/L, *Limnoraphis cf. birgei* con 131,516 cél/L, *Gloeocystis sp.* con 74,385 cél/L, *Aphanocapsa spp.* con 27,885 cél/L, *Aphanocapsa cf. delicatissima* con 23,479 cél/L y *Aphanothece sp.* con 22,663 cél/L. Las especies con menor abundancia promedio corresponden a *Tetraëdron sp.* con 67 cél/L, *Surirella sp.* con 37 cél/L, *Euglena sp.* 31 cél/L y *Actinotaenium sp.* 20 cél/L.

5.5 Análisis de la estructura de la comunidad fitoplanctónica

5.5.1 Variabilidad espacial de la composición y abundancia

- **Variación en la columna de agua**

De acuerdo a los valores de abundancia celular total, obtenidos para las profundidades de 0 metros, 10 metros y 20 metros se obtuvo que la abundancia total máxima en el muestreo superficiales (0 metros) se presentó en el mes de agosto y mayo con valores de 25×10^6 y 15×10^6 cél/mL correspondientemente. La mayor concentración celular es estos meses se observó en el punto 4 productos de las cianobacterias *Microcystis cf. aeruginosa*, *Limnoraphis cf. birgei* y *Microcystis cf. wesenbergii*. que presentaron concentraciones celulares por encima del umbral de los valores permitidos por la OMS por lo que estos meses se caracterizaron por una proliferación de cianobacterias de riesgo moderado para aguas recreacionales. La abundancia total mínima para el muestreo superficial se presentó en el mes de noviembre en el punto 8 con valores 18×10^3 cél/mL (Figura 20).

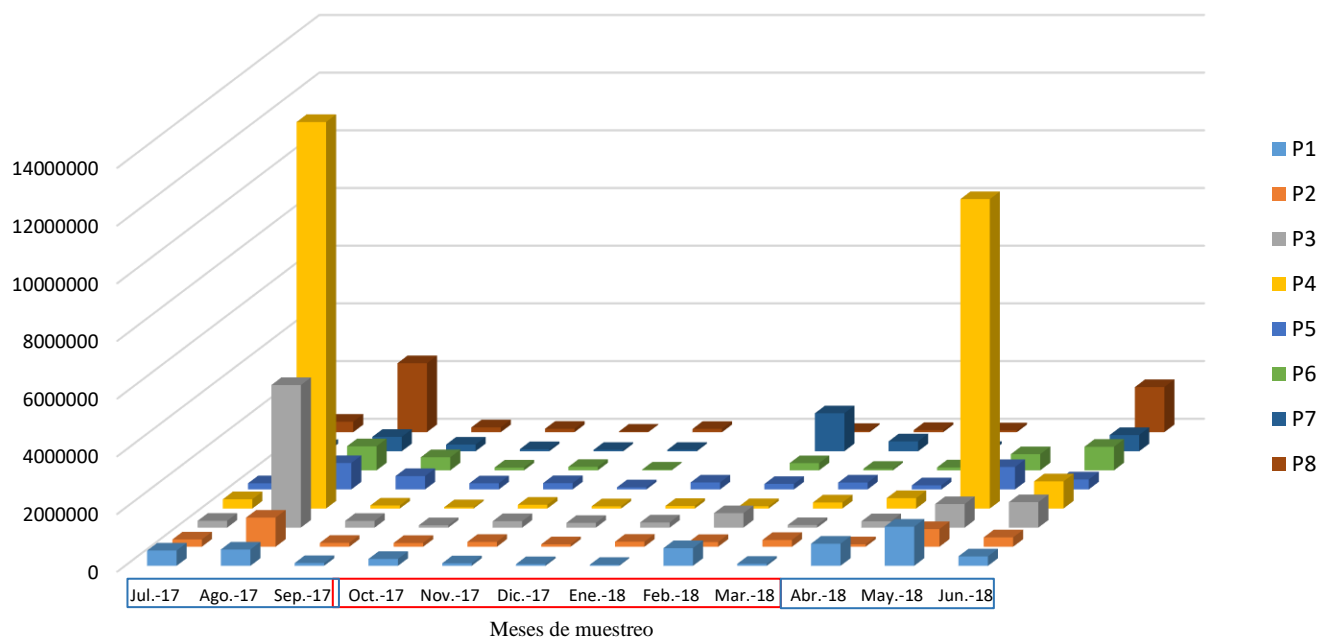


Figura 20. Abundancia celular promedio en 8 puntos de muestreo entre los meses de julio 2017 a junio 2018 a 0 metros de profundidad. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa

Para los valores obtenidos a los 10 metros de profundidad, el mes con mayor abundancia celular corresponde a diciembre en el punto 8 con un valor de 15×10^6 cél. /mL. abundancia que estuvo caracterizada por las especies de cianobacterias *Aphanocapsa cf. delicatissima*, *Gloeocapsa sp.* y *Microcystis cf. wesenbergii*. El mes con menor abundancia corresponde a marzo en el punto 6 con un valor de 19×10^3 cél. /mL (Figura 21).

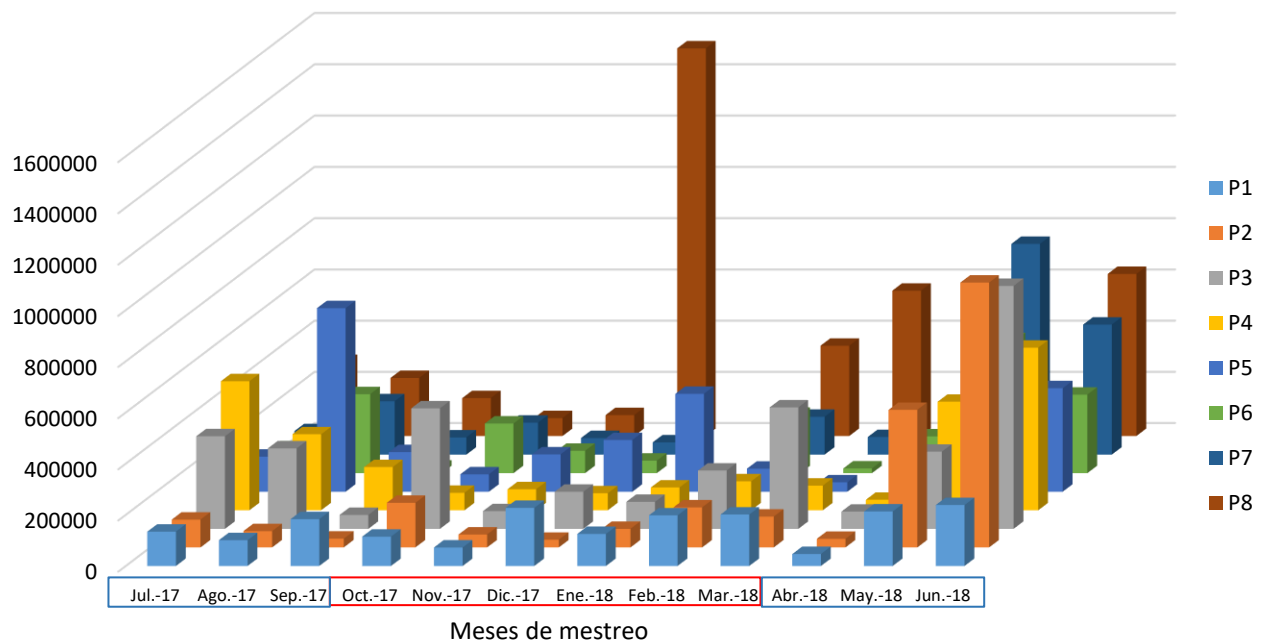


Figura 21. Abundancia celular promedio en 8 puntos de muestreo entre los meses de julio 2017 a junio 2018 a 10 metros de profundidad. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa.

A los 20 metros de profundidad el mes con mayor abundancia celular corresponde agosto en el punto 4, seguido del mes de junio en el punto 3. Las especies que contribuyeron a este incremento corresponde a *Microcystis cf. wesenbergii* *Microcystis cf. aeruginosa*, *Limnoraphis cf. birgei*, *Aphanocapsa cf. delicatissima* y *Oocystis solitaria*. El mes con menor concentración celular corresponde a diciembre en el punto 7. Con valores de 8×10^3 cél. /mL (Figura 22).

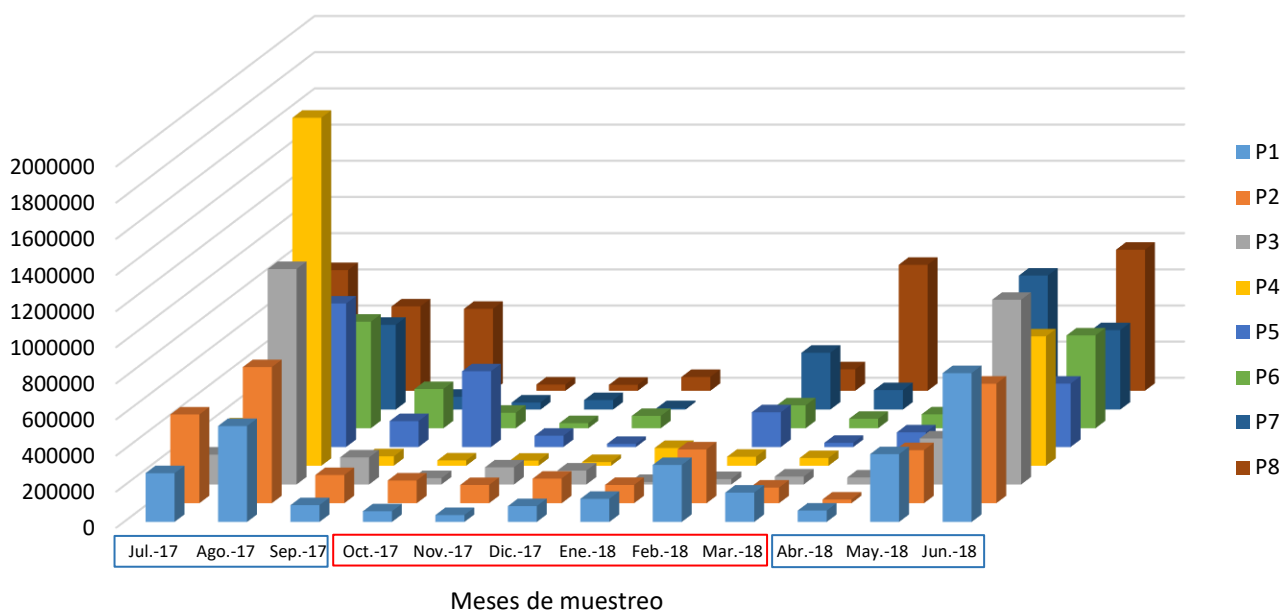


Figura 22. Abundancia celular promedio en 8 puntos de muestreo entre los meses de julio 2017 a junio 2018 a 20 metros de profundidad. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa.

El análisis ANOSIM con un valor de R global de -0.004 y un nivel de significancia igual a 78.9% indica una comunidad muy homogénea. De acuerdo a la similaridad obtenidos entre los distintos niveles de profundidad de 0, 10 y 20 metros no existe diferencia significativa en la abundancia y composición de la comunidad fitoplanctónica (Tabla 8).

Tabla 8. Similaridad de ANOSIM para comparar la comunidad de fitoplancton en los tres niveles de profundidad en el Lago de Coatepeque de julio 2017 a junio 2018. **R:** estadístico, **Nivel de Sig. (%):** Nivel de significancia en porcentaje.

Profundidades	R	Nivel de Sig. (%)
0M, 10M	-0.006	85.8
0M, 20M	0.003	27.0
10M, 20M	-0.008	90.5

El análisis de ordenamiento NMDS permitió observar que la variabilidad entre las distintas profundidades es muy baja lo que no permite establecer un patrón definido para cada profundidad haciendo que toda la comunidad fitoplanctónica se comporte de forma similar (Figura 23).

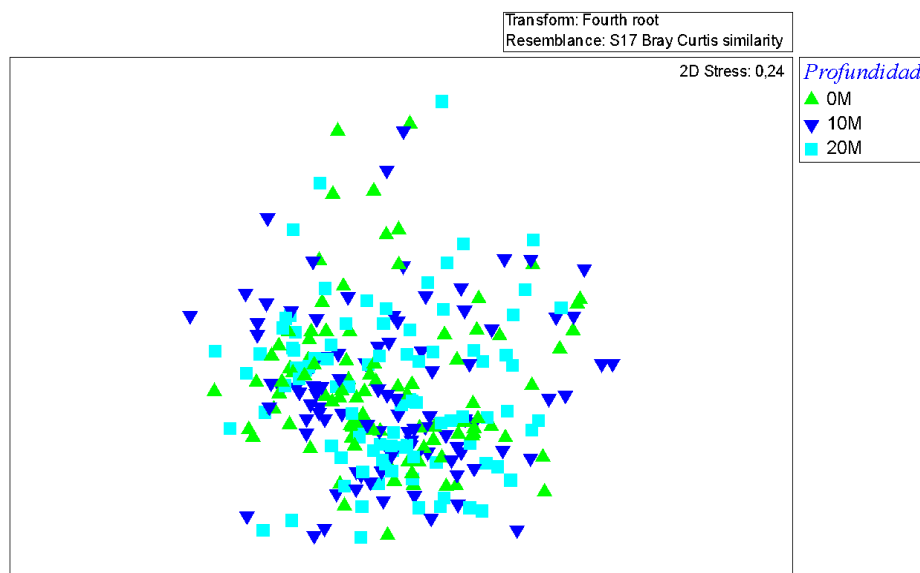


Figura 23. Análisis de ordenamiento NMDS de la comunidad fitoplanctónica por puntos de muestreo a diferentes profundidades en la columna de agua (0, 10 y 20 metros).

- **Variación entre puntos de muestreo**

En la figura 24 se presenta la abundancia total de la comunidad de fitoplancton en los distintos puntos de muestreo. El mayor rango de abundancia total se presentó en el punto 8 ubicado al sur, cercano a la isla Teopán. Alcanzando valores entre las 500,000 cél/L y las 2,000,000 cél/L, sitio en el cual, también se registraron los valores máximos en la abundancia total y el mayor promedio o media aritmética.

Los puntos de muestreo con rangos de abundancia total menores corresponden a el punto 5 ubicado en el centro del lago y el punto 3 ubicado al norte-este por lo que su variabilidad osillo entre los 300,000 cél/L y los 750,000 cél/L, registrando los valores mínimos en la abundancia total y el menor valor en las medias aritméticas.

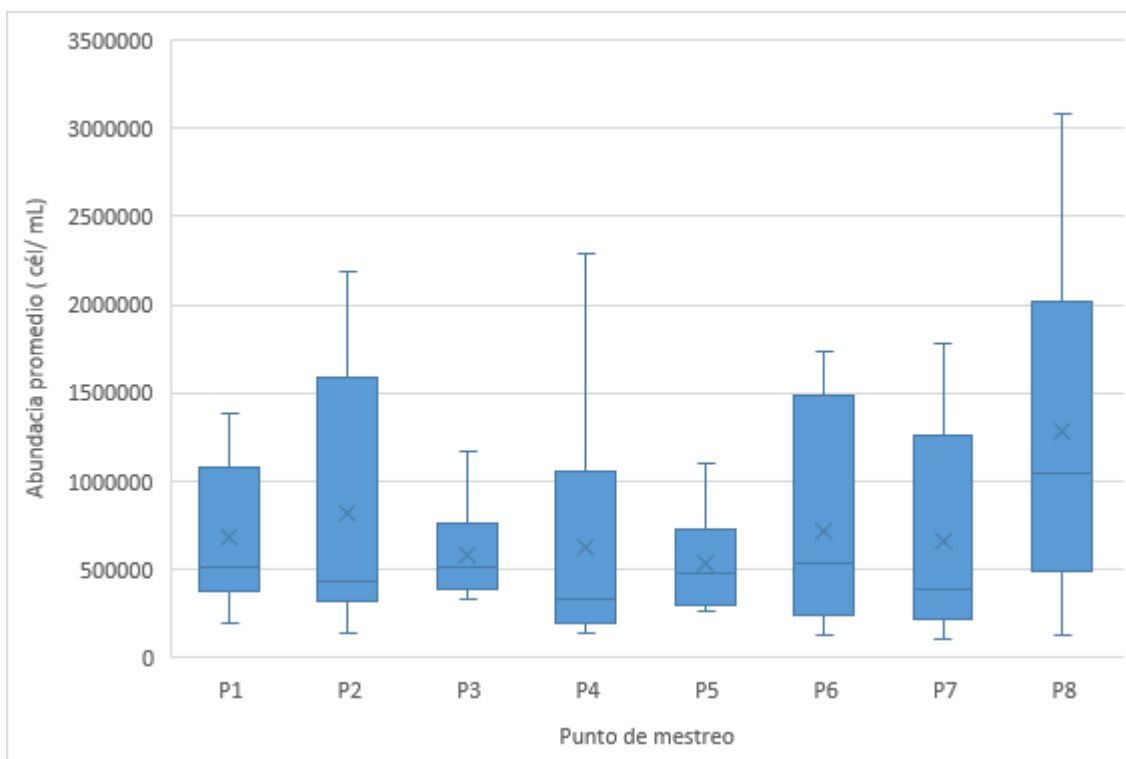


Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes sobre la abundancia total de la comunidad fitoplanctónica. El ancho de la caja representa la distancia entre el primer y el tercer cuartil, la línea interior la mediana, la "x" Media aritmética y la barra vertical los valores máximos y mínimos de la varianza con el objetivo de observar mejor los puntos extremos fueron eliminados.

El análisis de similitud ANOSIM entre los distintos puntos de muestreo con valor de R global de -0.004 y un nivel de significancia igual a 75%; la prueba indicó que no existe diferencias significativas entre los puntos de muestreo (Tabla 9).

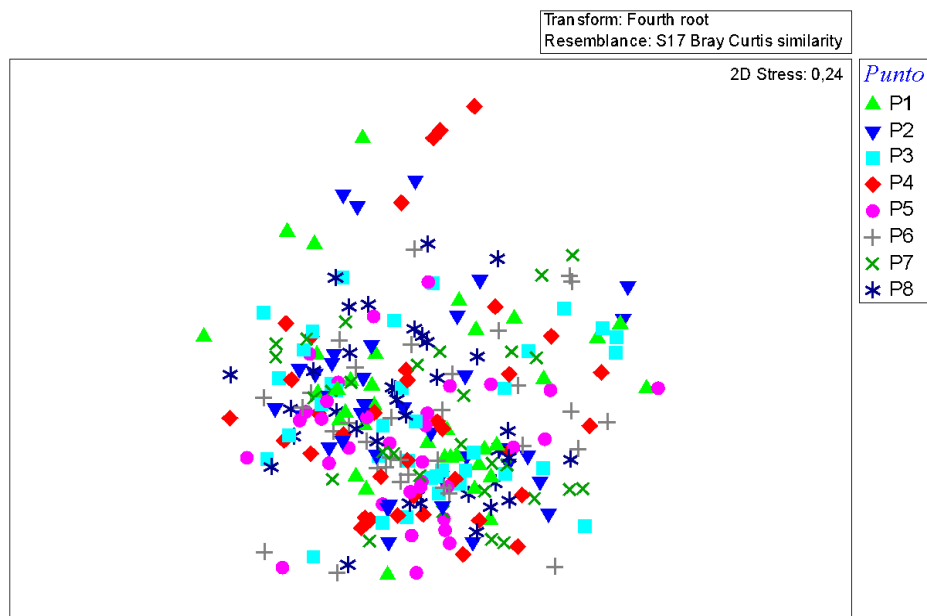
Tabla 9. Similaridad de ANOSIM para comparar la comunidad de fitoplancton en los puntos de muestreo del Lago de Coatepeque de julio 2017 a junio 2018. **R:** estadístico, **Nivel de Sig. (%):** Nivel de significancia en porcentaje.

Puntos de muestreo	R	Nivel de Sig. (%)
P1, P2	-0.018	87.8
P1, P3	-0.027	98.6
P1, P4	-0.013	75.1
P1, P5	0.016	15.1
P1, P6	-0.004	50.7
P1, P7	0.01	29.2

P1, P8	-0.01	67.8
P2, P3	-0.031	99.9
P2, P4	-0.022	95.5
P2, P5	-0.002	50
P2, P6	0.012	22.2
P2, P7	0.017	19.6
P2, P8	0.011	22
P3, P4	-0.03	99.6
P3, P5	-0.011	67.4
P3, P6	-0.011	72.6
P3, P7	-0.004	52.7
P3, P8	-0.003	51.3
P4, P5	-0.028	98.1
P4, P6	-0.005	51.6
P4, P7	-0.005	53.1
P4, P8	0.016	13.4
P5, P6	0.007	29.5
P5, P7	0.03	7.6
P5, P8	0.031	7
P6, P7	-0.034	98.7
P6, P8	-0.015	80.9
P7, P8	0.015	21.1

El análisis de ordenamiento NMDS entre los distintos puntos de muestreo permitió observar que no hubo diferencias significativas en la composición y abundancia de la comunidad fitoplanctónica; es decir que cada punto de muestreo se comportó de forma similar (Ver figura 25).

Figura 25. Análisis de ordenamiento NMDS de la comunidad fitoplanctónica en los puntos de muestreo registrados en el Lago de Coatepeque entre julio 2017 a junio 2018.



5.5.2 Variabilidad temporal de la composición y abundancia

Las especies *Microcystis cf. aeruginosa* y *Microcystis cf. wesenbergii* conformaron el 50% de abundancia promedio total en los meses de julio, diciembre de 2017, marzo y abril del 2018. Además, dichas especies conformaron el 85% de la abundancia promedio en el mes de agosto de 2018, a diferencia del mes de junio 2018 en el cual el 75% de la abundancia promedio se conformó únicamente por *Microcystis cf. aeruginosa* (Figura 26).

En los meses de septiembre, noviembre del 2017 *Limnoraphis cf. birgei*, representó el 40% de abundancia promedio, siendo el mes de mayo 2018 en el que su abundancia total fue mayor con un 90%. El mes de enero la especie con mayor abundancia promedio correspondió a *Cyclotella sp.* y *Aphanocapsa cf. delicatissima*. El mes de febrero la especie con mayor abundancia promedio correspondió a *Gloeocystis sp.* (Figura 26).

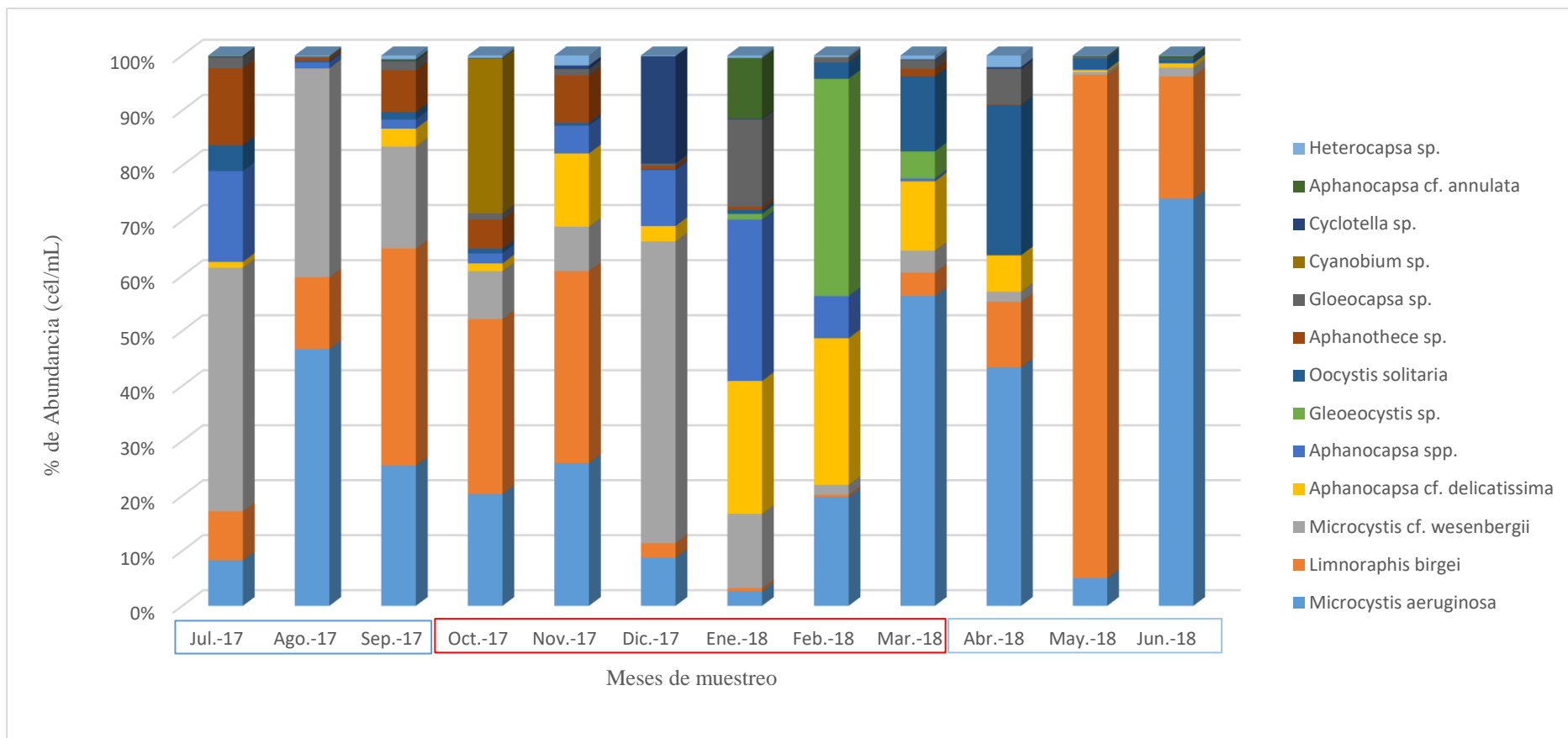


Figura 26. Porcentaje de abundancia promedio de las especies de la comunidad de fitoplancton en el Lago de Coatepeque, julio 2017 a junio 2018. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa.

El análisis de similaridad ANOSIM con un valor de R global de 0.198 y un nivel de significancia igual a 0.1% evidencio que existen diferencias significativas entre la época seca y lluviosa. La variación entre la composición y abundancia de la comunidad fitoplanctónica se verificó utilizando el análisis de ordenamiento NMDS (Ver figura 27).

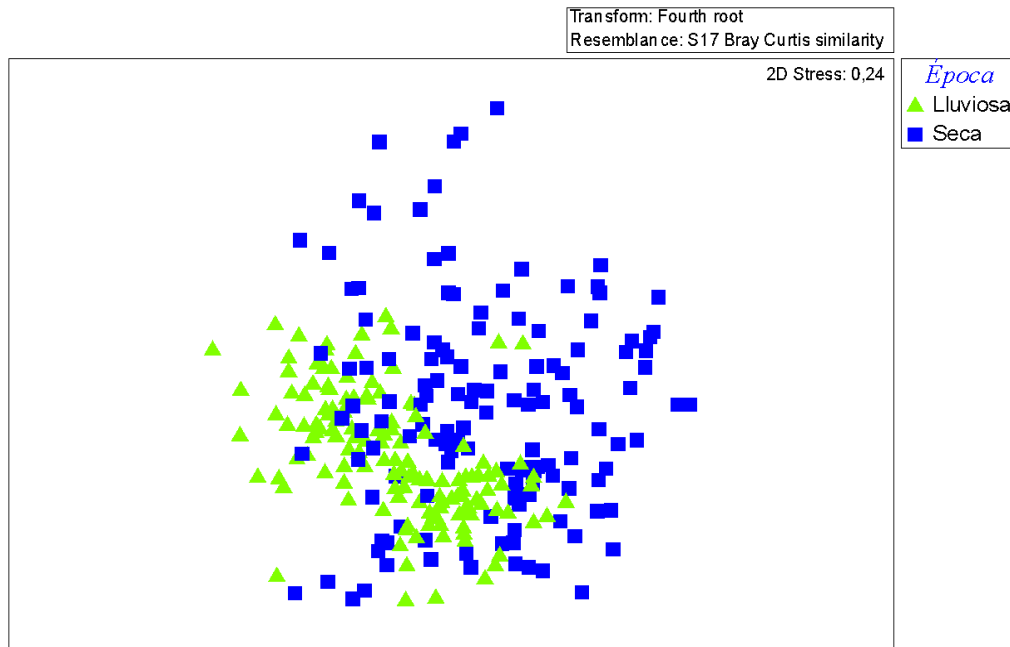


Figura 27. Análisis de ordenamiento NMDS de la comunidad fitoplanctónica para las épocas de muestreo registradas en el Lago de Coatepeque entre julio 2017 a junio 2018.

Mediante la prueba de SIMPER se determinó que la época lluviosa presenta una similaridad de 54,66 % y las especies con mayor contribución corresponden a *Limnoraphis cf. birgei*, *Microcystis cf. aeruginosa* y *Oocystis solitaria* (Tabla. 10). La época seca presenta una similaridad de 43,53 % y las especies con mayor contribución corresponden a *Gloeocapsa sp.*, *Aphanocapsa cf. delicatissima*, y *Oocystis solitaria* (Tabla 11). La disimilitud entre la época seca y lluviosa es de 55,67 % y las especies con mayor contribución corresponden *Microcystis cf. aeruginosa*, *Limnoraphis cf. birgei*, *Microcystis cf. wesenbergii*, *Aphanocapsa cf. delicatissima* (Tabla 12).

Tabla 10. Especies con mayor contribución a la similaridad en la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia promedio se expresa en raíz cuarta (**Av. Abund:** Abundancia promedio, **Av. Sim:** Promedio de similaridad, **Sim/SD:** Similitud/ desviación estándar, **% Contrib:** Porcentaje de contribución, **% Acum:** Porcentaje acumulado).

Especies	Av. Abund	Av. Sim	Sim/SD	% Contrib	% Acum
<i>Limnorphis cf. birgei</i>	15.76	12.98	2.51	23.74	23.74
<i>Microcystis cf. aeruginosa</i>	14.87	11.19	1.69	20.47	44.21
<i>Oocystis solitaria</i>	8.55	7.15	1.74	13.09	57.3
<i>Gloeocapsa sp.</i>	6.51	5.61	2	10.26	67.56
<i>Microcystis cf. wesenbergii</i>	10.14	4.62	0.68	8.45	76.01
<i>Heterocapsa sp.</i>	4.63	3.55	1.47	6.49	82.5
<i>Aphanocapsa cf. delicatissima</i>	3.98	1.63	0.47	2.97	85.48
<i>Aphanocapsa spp.</i>	4.41	1.42	0.45	2.59	88.07
<i>Cyclotella sp.</i>	2.38	1.37	0.78	2.5	90.57

Tabla 11. Especies con mayor contribución a la similaridad en la época seca de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia promedio se expresa en raíz cuarta. (**Av. Abund:** Abundancia promedio, **Av. Sim:** Promedio de similaridad, **Sim/SD:** Similitud/SD, **% Contrib:** Porcentaje de contribución, **% Acum:** Porcentaje acumulado).

Especies	Av. Abund	Av. Sim	Sim/SD	% Contrib	% Acum.
<i>Gloeocapsa sp.</i>	5.97	6.04	1.95	13.88	13.88
<i>Aphanocapsa cf. delicatissima</i>	7.88	5.64	0.85	12.95	26.83
<i>Oocystis solitaria</i>	6.18	5.39	1.63	12.38	39.21
<i>Limnorphis cf. birgei</i>	7.16	5.27	0.82	12.11	51.32
<i>Microcystis cf. aeruginosa</i>	8.16	4.86	0.73	11.17	62.5
<i>Heterocapsa sp.</i>	4	3.62	1.32	8.32	70.81
<i>Cyclotella sp.</i>	4.46	3.25	0.86	7.48	78.29
<i>Microcystis cf. wesenbergii</i>	4.33	1.53	0.38	3.51	81.8
<i>Aphanocapsa spp.</i>	4	1.47	0.36	3.37	85.17
<i>Raphidiopsis cf. mediterranea</i>	2.47	1.46	0.69	3.34	88.51
<i>Epithemia sp.</i>	2.01	1.08	0.51	2.47	90.98

Tabla 12. Especies con mayor contribución a la disimilaridad entre la época seca y la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER, la abundancia se expresa en raíz cuarta. (**Av. Abund:** Abundancia promedio, **Av. Sim:** Promedio de similaridad, **Sim/SD:** Similitud/SD, **% Contrib:** Porcentaje de contribución, **% Acum:** Porcentaje acumulado).

Especies	Época Lluviosa Av. Abund	Época Seca Av. Abund	Av. Diss	Diss/ SD	% Contrib	% Acum
<i>Microcystis cf. aeruginosa</i>	14.87	8.16	6.34	1.26	11.39	11.39
<i>Limnoraphis cf. birgei</i>	15.76	7.16	6.03	1.3	10.84	22.23
<i>Microcystis cf. wesenbergii</i>	10.14	4.33	5.75	1.15	10.33	32.56
<i>Aphanocapsa cf. delicatissima</i>	3.98	7.88	4.17	1.25	7.49	40.05
<i>Aphanocapsa spp.</i>	4.41	4.00	3.44	0.98	6.19	46.24
<i>Oocystis solitaria</i>	8.55	6.18	3.01	1.31	5.41	51.64
<i>Aphanothece sp.</i>	2.98	2.76	2.57	0.82	4.62	56.26
<i>Cyclotella sp.</i>	2.38	4.46	2.27	0.91	4.08	60.35
<i>Chroococcus cf. turgidus</i>	3.05	1.26	1.9	0.99	3.42	63.76
<i>Gloeocystis sp.</i>	0	3.29	1.88	0.53	3.38	67.14
<i>Gloeocapsa sp.</i>	6.51	5.97	1.85	1.13	3.31	70.45
<i>Heterocapsa sp.</i>	4.63	4	1.68	1.19	3.03	73.48
<i>Raphidiopsis cf. mediterranea</i>	1.78	2.47	1.5	1.14	2.7	76.18
<i>Epithemia sp.</i>	1.89	2.01	1.39	1.14	2.49	78.67
<i>Fragilaria spp.</i>	1.52	0.98	1.08	0.94	1.93	80.6
<i>Chroococcus spp.</i>	0.97	0.86	0.95	0.6	1.7	82.3
<i>Cymbella sp.</i>	1.17	0.86	0.93	0.87	1.67	83.97
<i>Amphora sp.</i>	0.98	1.09	0.92	0.81	1.66	85.63
<i>Gymnodinium sp.</i>	0.85	0.89	0.83	0.71	1.48	87.11
<i>Eunotia spp.</i>	0.65	0.69	0.69	0.57	1.24	88.35
<i>Aulacoseira sp.</i>	0.16	1.02	0.67	0.56	1.2	89.55
<i>Aphanocapsa cf. annulata</i>	0.67	0.59	0.66	0.33	1.18	90.74

5.5.3 Variación temporal de grupos morfo-funcionales

Durante el periodo de muestreo, se registró la abundancia de un total de 55 taxones que se clasificaron a partir de las dimensiones morfológicas medias y la presencia de los rasgos especializados según los grupos propuestos por Kruk *et al* (2010) (Tabla 13).

Tabla 13. Lista de especies encontradas durante el periodo de muestreo con su clasificación de Grupo Morfo-Funcional (GMF) según Kruk *et al* (2010) para el Lago de Coatepeque.

GMF	Taxón	Características
I	<i>Chlorella sp.</i>	Especies de tamaño pequeño con alta relación Superficie/Volumen, algunas especies muestran una alta tasa de crecimiento
	<i>Cyanobium sp.</i>	
	<i>Eucapsis sp.</i>	
	<i>Kirchneriella sp.</i>	
	<i>Monoraphidium sp.</i>	
	<i>Spirulina sp.</i>	
	<i>Synechococcus sp.</i>	
	<i>Tetraëdron sp.</i>	
III	<i>Dolichospermum sp.</i>	Organismos filamentosos con aerotopos.
	<i>Cylindrospermopsis sp.</i>	
	<i>Limnoraphis cf. birgei</i>	
	<i>Oscillatoria spp.</i>	
	<i>Planktothrix sp.</i>	
	<i>Raphidiopsis sp.</i>	
IV	<i>Actinastrum sp.</i>	Organismos de tamaño intermedio que carecen de rasgos especializados.
	<i>Ankistrodesmus sp.</i>	
	<i>Homoeothrix sp.</i>	
	<i>Coelastrum sp.</i>	
	<i>Gloeocystis sp.</i>	
	<i>Crucigenia sp.</i>	
	<i>Chroococcus spp.</i>	
	<i>Gloeocapsa sp.</i>	
	<i>Oocystis solitaria</i>	
	<i>Pseudanabaena sp.</i>	
	<i>Synechocystis sp.</i>	
	<i>Pediastrum sp.</i>	
	<i>Rhizoclonium sp.</i>	
	<i>Spirogyra sp.</i>	
V	<i>Eudorina sp.</i>	Unicelular flagelado de mediano a gran tamaño.
	<i>Gymnodinium sp.</i>	
	<i>Heterocapsa sp.</i>	
	<i>Euglena sp.</i>	
VI	<i>Amphora sp.</i>	Organismos no flagelados con estructuras de sílice.
	<i>Aulacoseira sp.</i>	

	<i>Cocconeis spp.</i>	
	<i>Cyclotella sp.</i>	
	<i>Cymbella sp.</i>	
	<i>Epithemia sp.</i>	
	<i>Eunotia sp.</i>	
	<i>Fragilaria spp.</i>	
	<i>Gomphonema sp.</i>	
	<i>Navicula sp.</i>	
	<i>Nitzschia sp.</i>	
	<i>Surirella sp.</i>	
	<i>Tetraëdron sp.</i>	
	<i>Thalassiosira sp.</i>	
VII	<i>Aphanocapsa cf. annulata</i>	
	<i>Aphanocapsa cf. delicatissima</i>	
	<i>Aphanocapsa spp.</i>	
	<i>Aphanothece sp.</i>	
	<i>Chroococcus turgidus</i>	
	<i>Coelomoron sp.</i>	
	<i>Gloeocapsa cf. gelatinosa</i>	
	<i>Gomphosphaeria sp.</i>	
	<i>Microcystis cf. aeruginosa</i>	
	<i>Microcystis cf. wesenbergii</i>	
	<i>Radiocystis sp.</i>	

De acuerdo a esta clasificación el grupo con mayor frecuencia corresponde al grupo VII con un 27%, seguido del grupo IV y VI con 22% y 25% respectivamente; los grupos III con 14% y V con 10% siendo el grupo I el que presenta menor frecuencia (Figura 28).

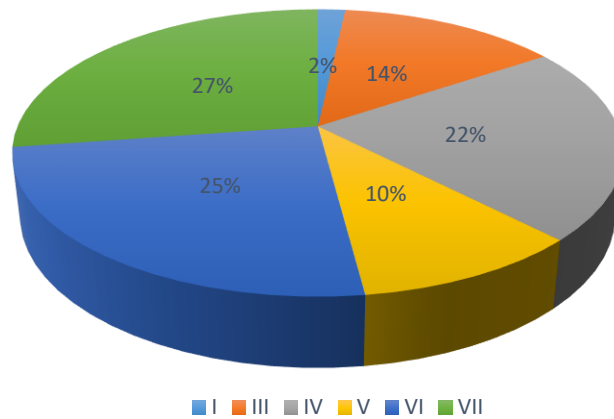


Figura 28. Frecuencia de los grupos morfo-funcionales de la comunidad de fitoplancton del Lago de Coatepeque de julio 2017 a junio 2018.

Los porcentajes de abundancia promedio de los grupos morfo-funcionales durante el periodo de muestreo se presentan en la figura 29, de los cuales se determinó que el mes de julio y agosto del 2017, abril y junio 2018 de la época lluviosa, y diciembre del 2017, enero, febrero, marzo 2018 de la época seca estuvieron conformados entre el 60% y un 80% por el grupo VII (organismos formadores de grandes colonias mucilaginosas), dominado principalmente por *Microcystis cf. aeruginosa* y *Microcystis cf. wesenbergii*.

Con respecto al mes de septiembre del 2017, mayo del 2018 época lluviosa y noviembre del 2017 de la época seca estuvieron conformados entre el 50% y un 90% por el grupo III, (organismos filamentosos con aerotopos), dominado principalmente por *Limnoraphis cf. birgei*; sobresaliendo el mes de mayo por estar conformado en un 90% por este grupo.

En este periodo, los grupos con menor porcentaje de abundancia promedio fueron el grupo I, IV, V y VII. El grupo I (organismos de tamaño pequeño con una alta tasa de crecimiento), la abundancia promedio que se obtuvo fue entre el 1% y 3% sin embargo, es importante mencionar que el mes de octubre 2017 de la época seca, fue conformado en un 60% por este dominado principalmente *Cyanobium sp.*

El grupo IV (organismos de tamaño pequeño que carecen de rasgos especializados), alcanzó valores entre el 3 % y 40%, siendo el mes de enero, febrero, marzo y abril 2018 de la época seca notables por su abundancia promedio superior al 10 %, considerándose febrero el mes donde este grupo alcanzó su mayor abundancia promedio con un 40% dominado por *Gloeocystis sp.*

El grupo V (organismos flagelados) alcanzó valores entre el 3% al 7% fue el mes abril en donde mayor abundancia promedio puede observarse. El grupo VII (organismos no flagelados con estructuras de sílice) el cual su abundancia promedio siempre fue inferior al 3% excepto en el mes de diciembre 2017 donde alcanzó el 20%. Por la dominancia de *Cyclotella sp.*

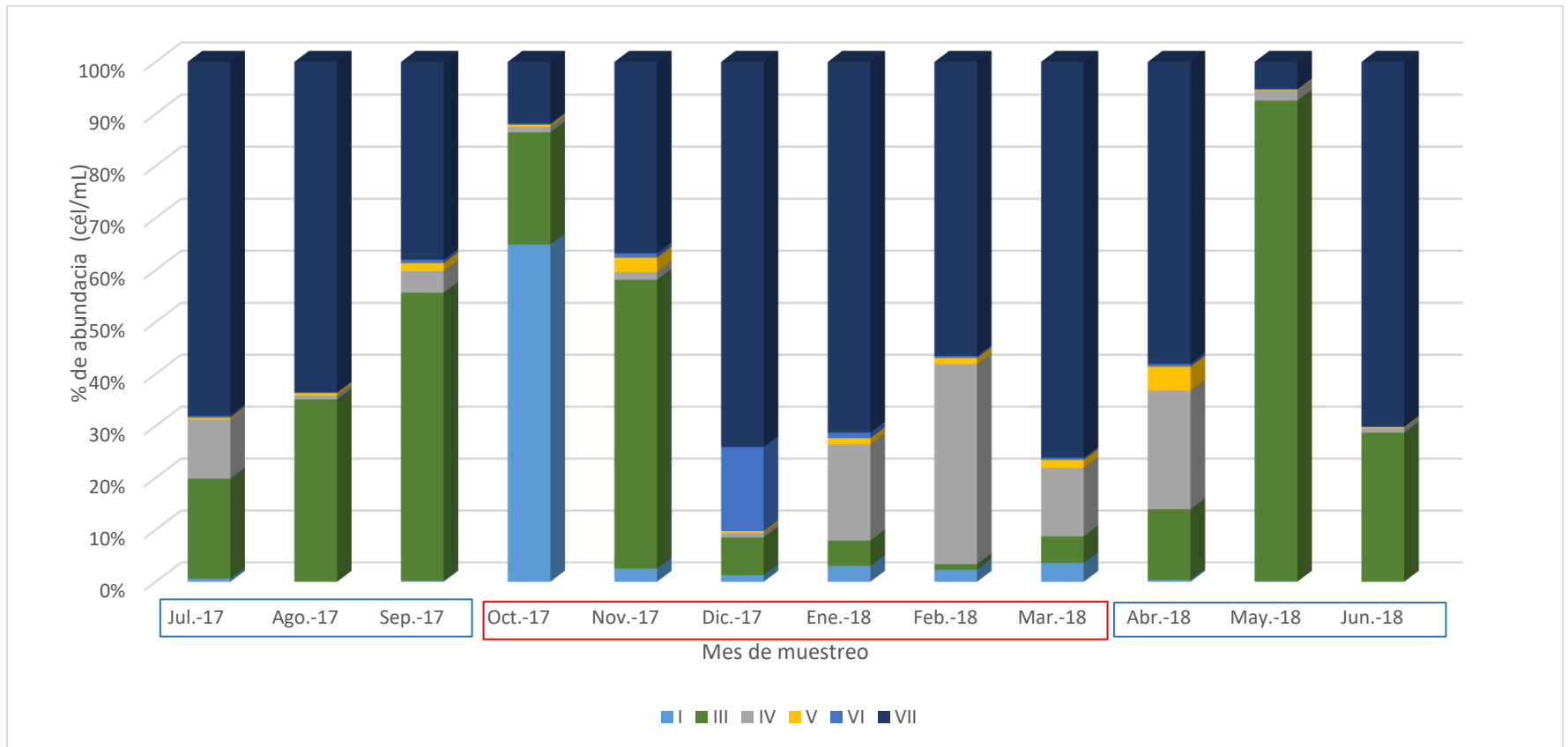


Figura 29. Porcentaje de abundancia promedio de los grupos morfo-funcionales de la comunidad de fitoplancton por mes de muestreo. Recuadro color rojo meses de la época seca, recuadro azul meses de la época lluviosa.

La prueba ANOSIM con un valor de R global de 0.266 y un valor de significancia igual a 0.1% demostró que existen diferencias significativas en la composición y abundancia de los grupos morfo-funcional entre la época seca y lluviosa (Tabla 14 y 15). El análisis de ordenamiento NMDS evidencio esta leve diferenciación espacial (Figura 30). Mediante la prueba SIMPER se determinó que la época lluviosa presenta una similaridad de 76.6 % y los grupos con mayor contribución a dicha similaridad son los grupos IV, V, VI y VII. La época seca presenta una similaridad de 67.85%. Los grupos con mayor contribución corresponden a V, IV, VII y VI. La disimilitud entre la época seca y lluviosa es de 31.60 % y los grupos con mayor contribución IV, V, VI y VII (Tabla 14).

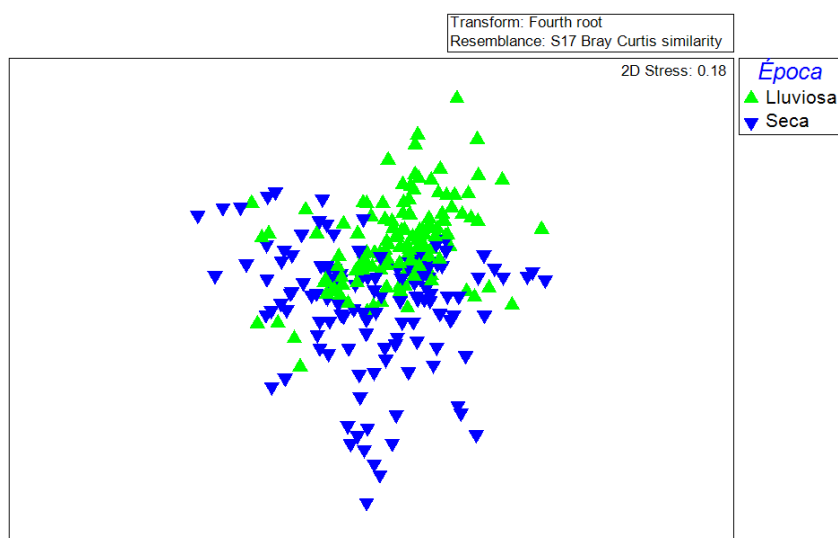


Figura 30. Análisis de ordenamiento NMDS de Grupos Morfo-funcionales para las épocas de muestreo.

Tabla 14. Grupos Morfo-funcionales con mayor contribución a la similaridad entre la época seca de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia se expresa en la raíz cuarta (**Av. Abund:** Abundancia promedio, **Av. Sim:** Promedio de similaridad, **Sim/SD:** Similitud/SD, **% Contrib:** Porcentaje de contribución, **% Acum:** Porcentaje acumulado).

GFBM	Av. Abund	Av. Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum. %
V	7.41	22.3	2.57	32.86	32.86
IV	7.78	20.01	1.73	29.49	62.35
VII	4.78	13.46	1.9	19.84	82.19
VI	4.08	11.2	1.51	16.5	98.69

Tabla 15. Grupos Morfo-funcionales con mayor contribución a la similaridad entre la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia se expresa en raíz cuarta (**Av. Abund:** Abundancia promedio, **Av. Sim:** Promedio de similaridad, **Sim/SD:** Similitud/SD, **% Contrib:** Porcentaje de contribución, **% Acum:** Porcentaje acumulado).

GFBM	Av. Abund	Av. Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum. %
IV	14.24	33.8	2.88	44.44	44.44
V	8.05	21.94	2.87	28.84	73.28
VI	4.64	10.74	1.8	14.12	87.4
VII	3.69	9.48	2.06	12.47	99.87

Tabla 16. Grupos Morfo-funcionales con mayor contribución a la disimilaridad entre la época seca y la época lluviosa de acuerdo al análisis SIMPER. La abundancia se expresa en la raíz cuarta (**Av. Abund:** Abundancia promedio, **Av. Sim:** Promedio de similaridad, **Sim/SD:** Similitud/SD, **% Contrib:** Porcentaje de contribución, **% Acum:** Porcentaje acumulado).

GFBM	Época Lluviosa Av. Abund	Época Seca Av. Abund	Av. Diss	Diss /SD	Contrib%	Cum. %
IV	14.24	7.78	13.82	1.37	43.73	43.73
V	8.05	7.41	5.98	1.27	18.91	62.64
VI	4.64	4.08	4.49	1.18	14.2	76.85
VII	3.69	4.78	4.2	0.9	13.3	90.15

5.6 Variables físico-químicas del lago de Coatepeque.

5.6.1 Temperatura

La temperatura del agua en todo el sistema osciló entre los 22.5 °C y los 30 °C. Durante la época seca se observó una disminución en la temperatura superficial (0 metros), intermedia (10 metros) y de compensación (20 metros) marcando una escasa diferenciación de temperatura en las distintas profundidades. La época lluviosa presenta temperaturas promedio mayores; con respecto a la variación se observó una leve estratificación térmica, siendo más evidente en el mes de agosto 2017 con una diferencia de temperatura entre la

superficie y la profundidad de 3 °C., marzo con una diferencia de 2.6 °C y mayo 2018 con una diferencia 2 °C. (Figura 31).

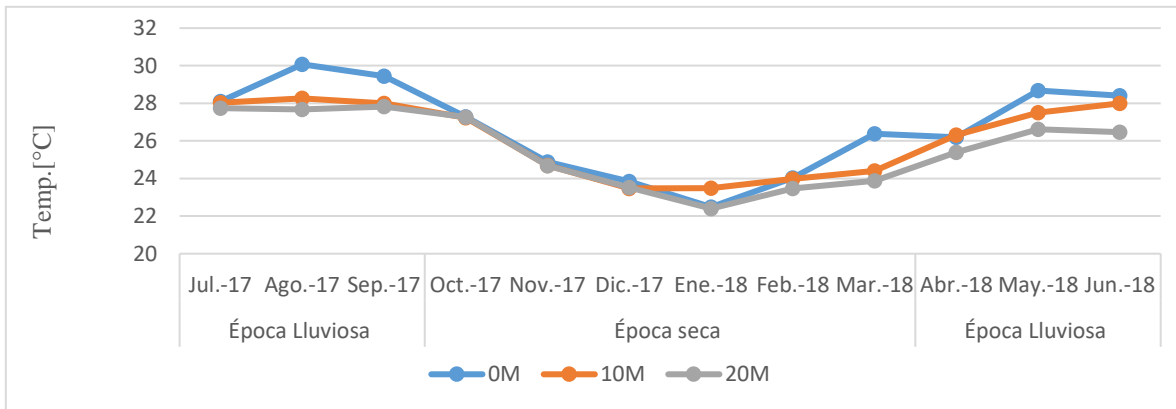


Figura 31. Perfil de la temperatura promedio mensual para las distintas profundidades muestreadas en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018.

De acuerdo a la variación de temperatura en la profundidad superficial (0M) el punto con valores de temperatura menos disperso corresponde a la zona de Las Lajas con valores entre los 24 °C y 28 °C a diferencia la profundidad de 10 metros (10M) y 20 metros (20M) donde el punto con menor variación corresponde de a la zona de Los Antojos (P6) con valores entre los 23 °C y 28.3°C y El Centro del Lago (P5) entre los 23.7 °C y 28 °C respectivamente.

Con respecto a las distintas profundidades lo puntos ubicados al occidente y norte de lago que corresponden a las zonas de Bajadero la Bendición (P1), Club el Salvador (P2) Cardedeu (P3) presentan mayor variación de temperatura a diferencia de los ubicados al Sur y Oriente que corresponden al Centro del Lago (P5), Los Antojos (P6) La Peñona y La Isla Teopán (P8) (Figura 32).

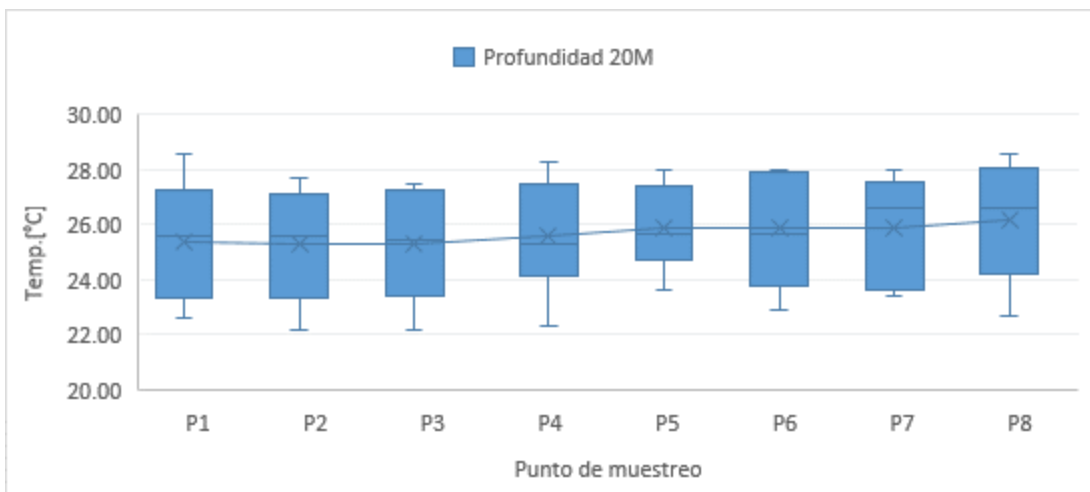
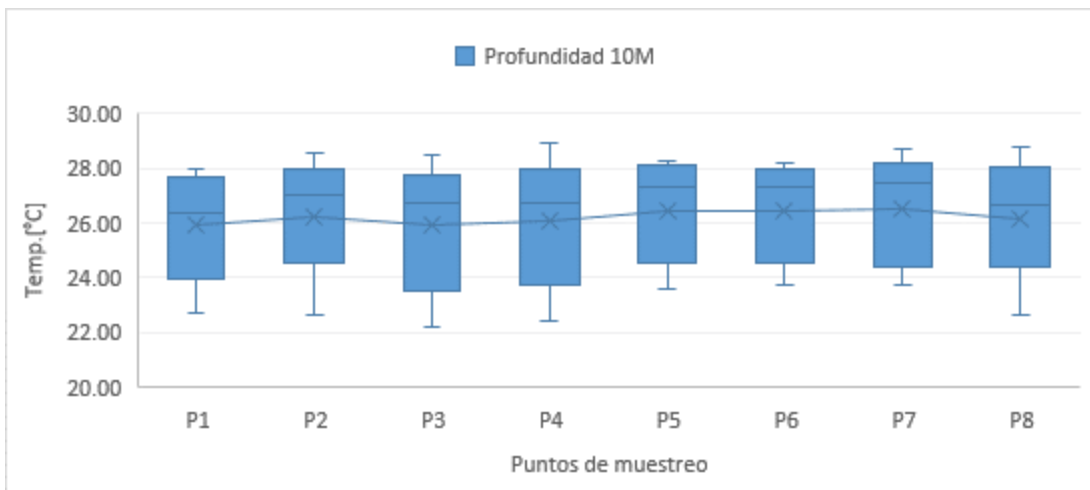
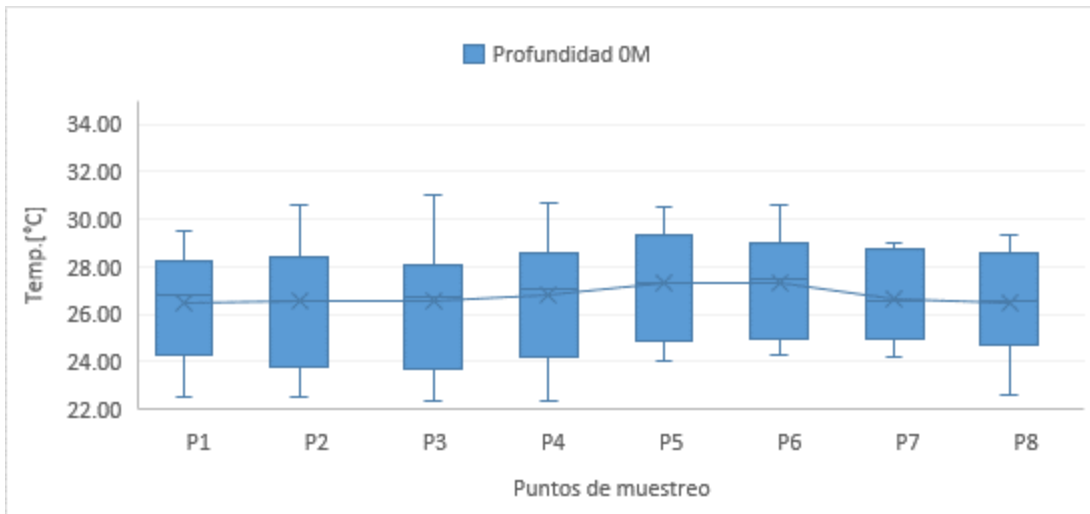


Figura 32. Diagrama de cajas y bigotes. de los valores de temperatura en la profundidad de 0 metros (0M), 10 metros (10M) y 20 metros (20M) en los distintos puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018.

5.6.2 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH presentó un promedio de 8.5 para todo el sistema, siendo el valor más bajo registrado de 7.5 en el mes de octubre 2017 (época seca) que corresponde a los valores de profundidades profundidad superficial (0M), el más alto de 9.0 en el mes de julio 2018 (época lluviosa) que corresponde a la profundidad de 10 metro. Con respecto a los valores, las distintas profundidades presentan pH similares (Figura 33). En cada uno de los puntos de muestreo los valores promedios más altos corresponden a la profundidad intermedia en la zona del Bajadero la Bendición (P1), Club El Salvador (P2), El centro del Lago (P5) y zona de los Anteojos (P6), a excepción de la zona de Cardedeu (P3) donde los valores más alto se observaron en la superficie. En la zona de Catillo del Rey (P4), zona de La Peñona (P7) y zona de la Isla Teopán (P8) presentan valores mayores a los 20 metros (Figura 33).

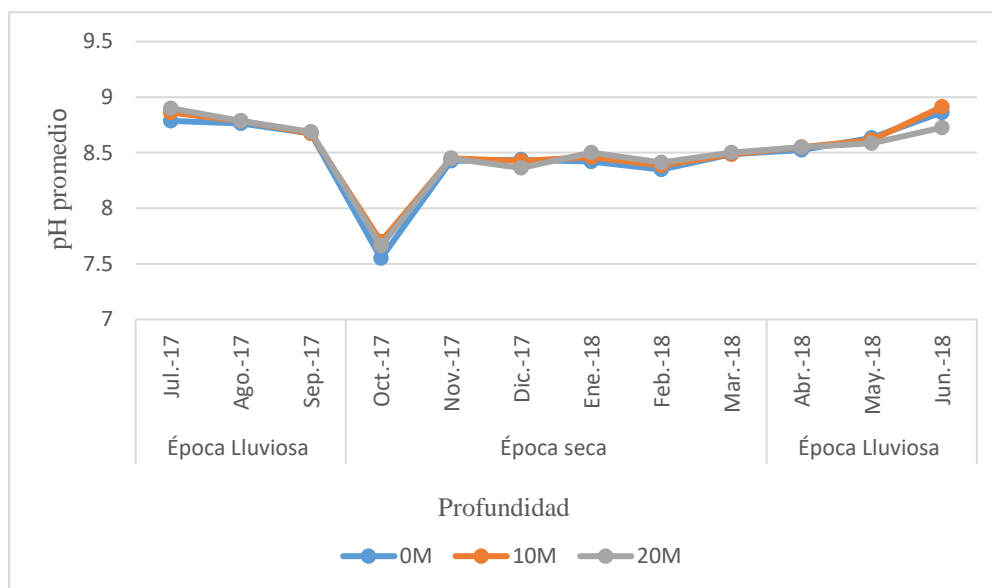


Figura 33. Valores promedio de pH mensuales con respecto a la profundidad superficial (0M), Profundidad intermedia 10 metros (10M) profundidad de 20 metros (20M) muestreadas en El Lago de Coatepeque.

Con respecto a la variación de los valores de pH tanto en a la profundidad superficial (0M), profundidad intermedia 10 metros (10M) y profundidad de 20 metros (20M) los valores con mayor variación corresponden a la zona del centro del lago (P5) con valores entre los 7.5 a 9.2. Es importante mencionar que las tres profundidades muestreadas presentan valores atípicos pH bajos a excepción de los presentados en la zona de La Isla Teopán (P8) con un valor superior (Figura 34).

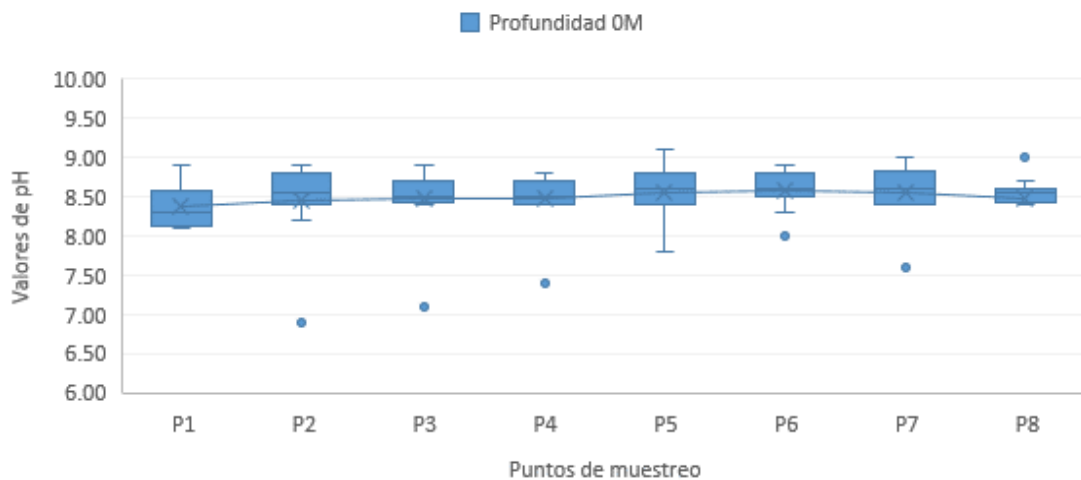
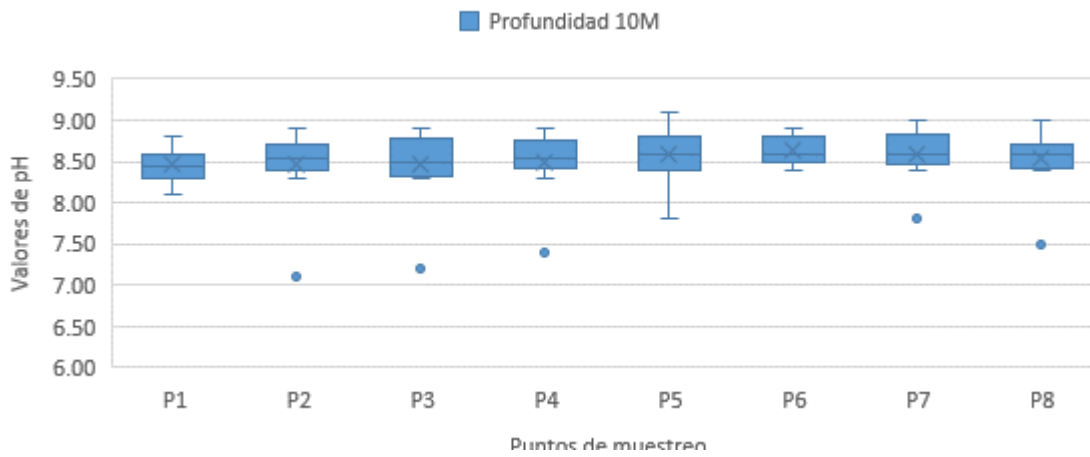
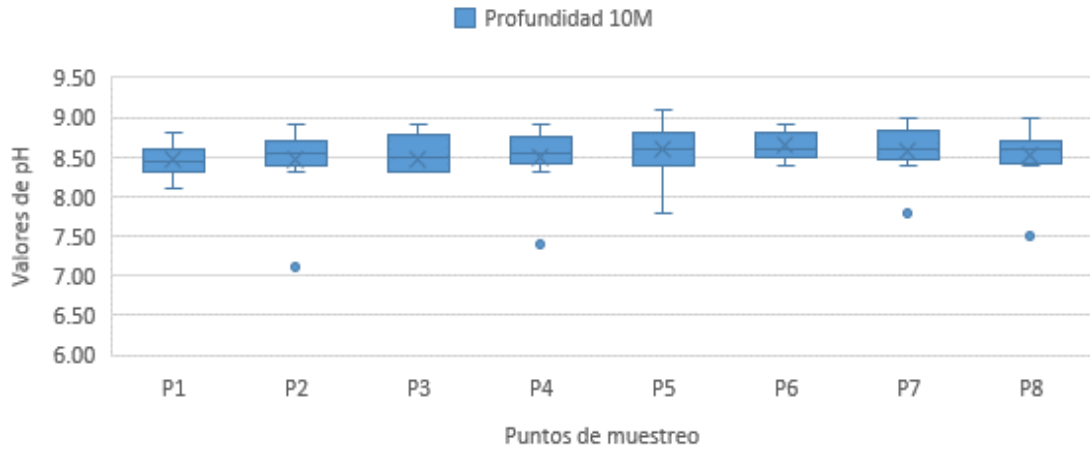


Figura 34. Variación de los valores de pH en la profundidad de 0 metros (0M), 10 metros (10M) y 20 metros (20M) en los distintos puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018.

5.6.3 Sólidos disueltos totales (ppm)

La variable de sólidos disueltos totales presentó valores promedios para todo el sistema de 962.7 ppm; el valor más bajo de 939.6 se presentó en octubre 2017 (época seca) y el más alto de 981.25 en el mes de abril 2018 (época lluviosa). a lo largo del periodo de muestreo las distintas profundidades mostraron mayor concentración de sólidos disueltos en la profundidad de 20 metros, disminuyen a los 10 metros y 0 metros, con una excepción en el mes de enero 2018 donde los sólidos disueltos superficiales (0M) fueron mayores (Figura 35).

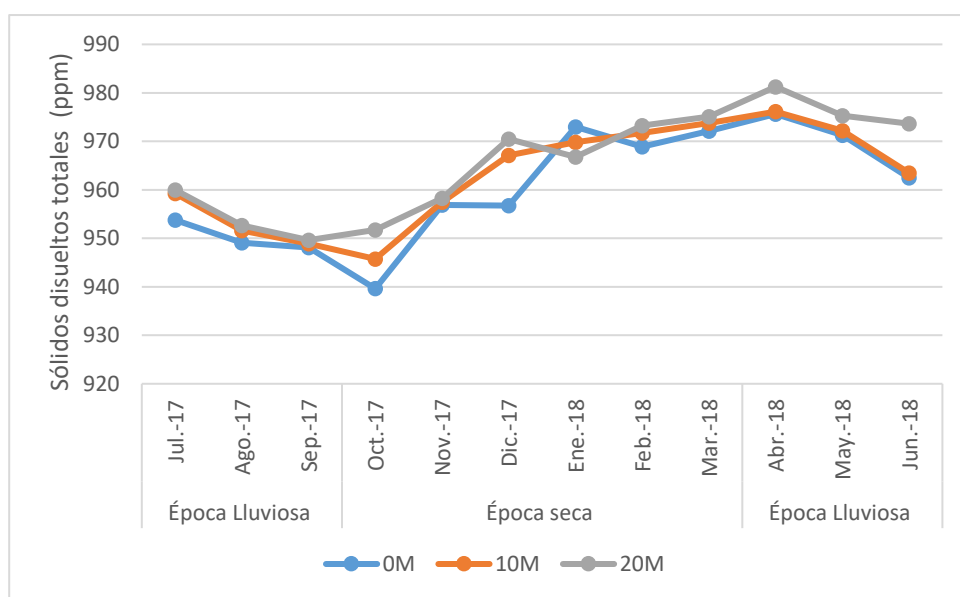


Figura 35. Valores promedio de Sólidos disueltos totales (ppm) mensual con respecto a la profundidad superficial (0M), profundidad intermedia de 10 metros (10M) y profundidad de 20 metros (20M) muestreadas en El Lago de Coatepeque durante el periodo de julio 2017 a junio 2018.

De acuerdo con la concentración de sólidos disueltos en la profundidad superficial, de 10 metros y 20 metros la variación de los datos es similar en los distintos puntos, la concentración osciló entre los 920 y 990 (ppm). Los valores atípicos se presentaron en las muestras superficiales de la zona de la Isla Teopán (P8) (Figura 36).

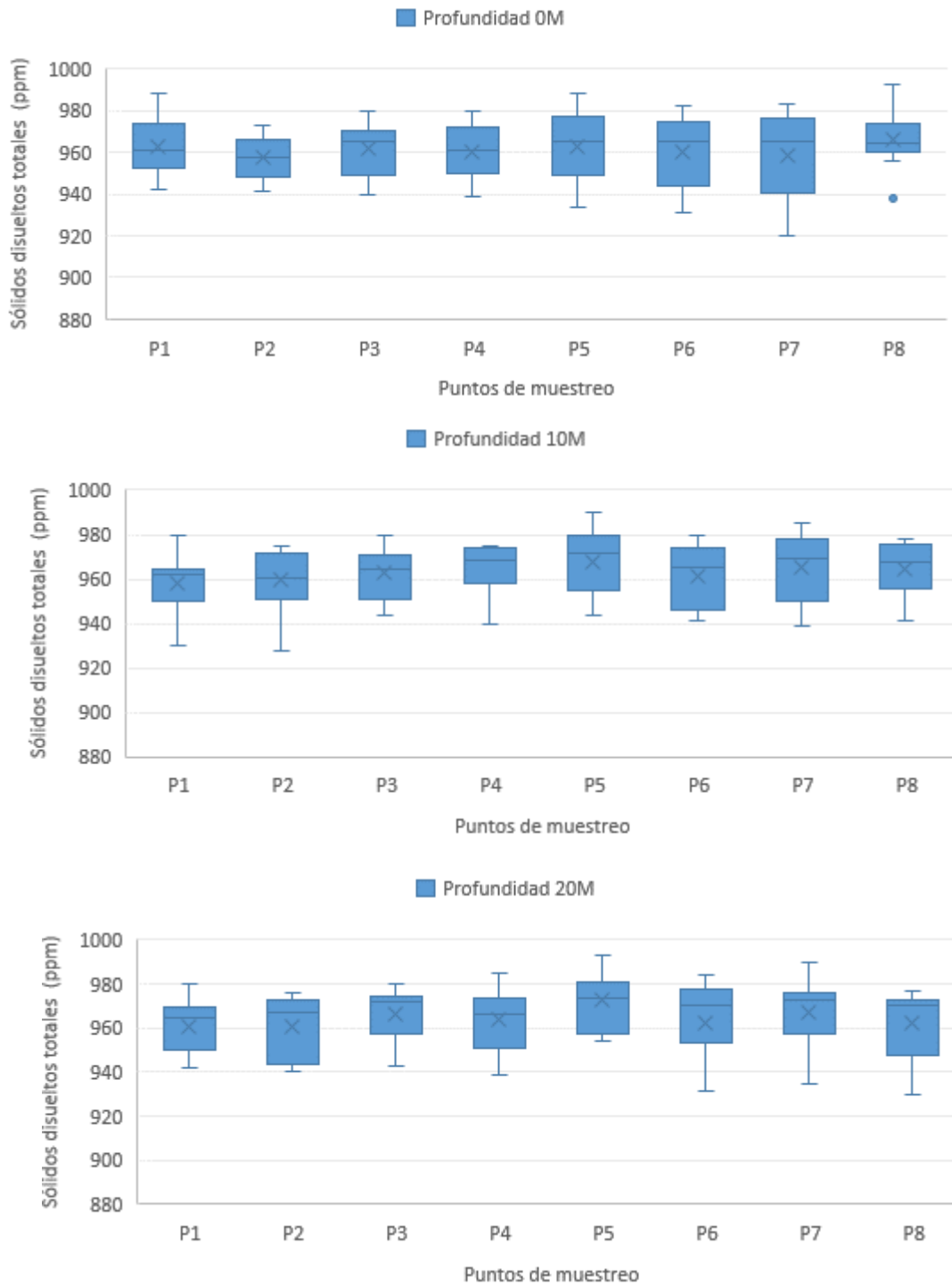


Figura 36. Variación de la concentración de Sólidos disueltos totales (ppm) en la profundidad de 0 metros (0M), 10 metros (10M) y 20 metros (20M) en los distintos puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018.

5.6.4 Transparencia

El valor promedio de transparencia para todo el sistema fue de 5.79 metros, el valor promedio más bajo fue de 1.68 metros en el mes de septiembre 2017, el valor más alto de 9.05 metros correspondió al mes de marzo 2018. Durante el periodo de muestreo se observó que los meses de la época seca presentaron promedios de transparencia mayores que oscilaron entre 6.0 metros y los 9.5 metros de profundidad, a diferencia de la época lluviosa con promedios más bajos entre 1.68 metros a 5 metros (Figura 37a)

La transparencia por puntos de muestreo indicó que la variación en el sistema es muy similar, el 75% de los datos se encuentra distribuido por encima de los 4 metros de los cuales, los valores más altos se presentaron en el punto 7 que corresponde a la zona de las lajas seguido del punto 1 zona conocida como Bajadero la Bendición y punto 2 cercano al Club de El Salvador (Figura 37b).

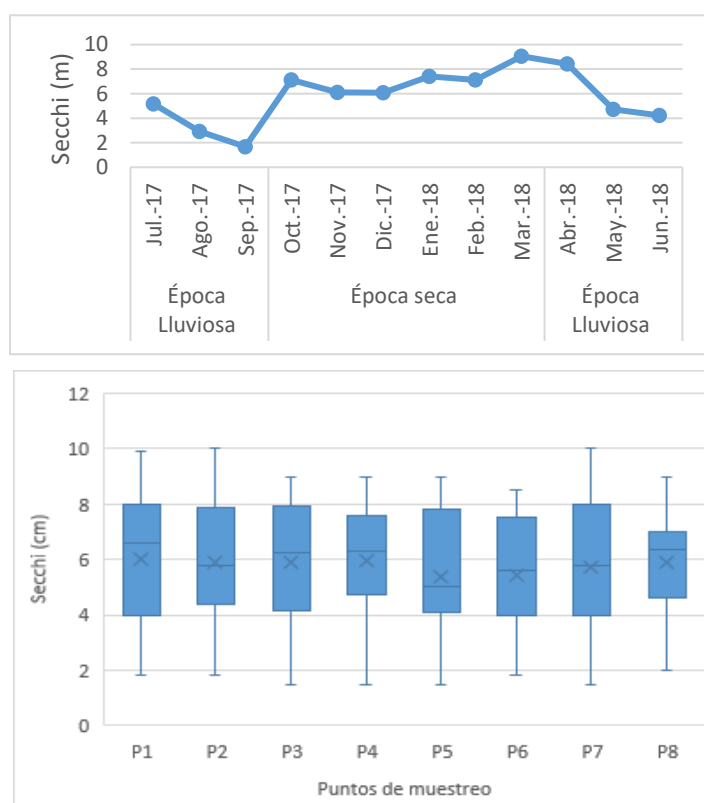


Figura 37. a) Valores promedio de transparencia mensuales con respecto a las distintas profundidades muestreadas y b) Variación de transparencia por puntos de muestreo en El Lago de Coatepeque entre el periodo de julio 2017 y junio 2018.

6.7 Relación de los parámetros físico-químicos y la estructura de la comunidad fitoplanctónica.

Se detectó una correlación estadísticamente significativa entre las variables físico-químicas y la comunidad fitoplanctónica ($R = 0.327$) aunque dicha correspondencia es baja; el mejor ajuste de las variables ambientales con la comunidad de fitoplancton corresponde a la temperatura (0.3271), seguido del pH (0.293) y la conductividad (0.266), siendo la Transparencia el parámetro con menor correlación (0.226) (Tabla 17).

Tabla 17. Matriz de variables utilizadas y resultados de la selección de variables ambientales de la prueba BIO-ENV para explicar la abundancia de la comunidad fitoplanctónica en el ambiente del Lago de Coatepeque entre julio 2017 y junio 2018. (**Temp. [°C]**: Temperatura en Centígrados (1), **pH**: Potencial de Hidrogeno (2), **TDS. (ppm)** Sólidos disueltos totales (**ppm**) (3), y **Secchi (cm)**: Transparencia (4)).

Número de variables combinadas	Correlación de Spearman (ρ_w)	Selección de variables
1	0.327	Temp. [°C]
2	0.293	Temp. [°C]; TDS. (ppm)
2	0.273	Temp. [°C]; Secchi (cm)
3	0.266	Temp. [°C]; TDS. (ppm); Secchi (cm)
2	0.245	Temp. [°C]; pH
3	0.236	Temp.[°C]; pH; Secchi (cm)
3	0.233	Temp. [°C]-TDS. (ppm)
4	0.226	Todos
2	0.134	TDS. (ppm); Secchi (cm)
2	0.133	pH; Secchi (cm)

VI. DISCUSIÓN

El análisis de la composición y la riqueza de la comunidad fitoplanctónica es clave en un contexto de gestión y monitoreo ambiental (Guo *et al.* 2010). A pesar de que la biodiversidad es un concepto que no se puede reducir a un único número (Sarkar 2002 y Magurran 2004), hay razones que sustentan el uso de la riqueza de especies como un indicador ecológico del estado general de los ecosistemas (Dale y Beyeler 2001).

Los resultados de esta investigación señalan que se obtuvo una riqueza total de 99 especies de los cuales las Bacillariophytas seguido de las Cianobacterias y las Chlorophytas conformaron los grupos con mayor número de especies. Así mismo en estudios similares en lagos de origen volcánico de la región como lo son los lagos Xolotlán (Hernández *et al.* 2018) en Nicaragua y Atitlán (Arriola *et al.* 2017) en Guatemala registran a las Bacillariophytas como uno de los grupos con mayor contribución a la riqueza de especies. Por otra parte, en el lago Masaya, el lago Tiscapa en Nicaragua (Hernández *et al.* 2018), lago Yojoa en Honduras (Hernández *et al.* 2016) y Amatitlán (Rodas *et al.* 2020) en Guatemala el grupo con mayor riqueza corresponde a las Cianobacterias.

Los valores del índice de diversidad de Shannon-Wiener para la comunidad de fitoplancton oscilaron entre 0.1 y 1.9 bits ind⁻¹ con un promedio de 1.2 bits ind⁻¹, los valores del índice de dominancia de Simpson corresponden a 0.04 y 0.8 con un promedio de 0.5, El índice de Shannon y Wiener, según Magurran (2004) usualmente está entre 1.5 y 3.5 en este muestreo casi todos los valores son inferiores a este rango e indican un sistema poco diverso; finalmente el índice de Simpson (Peet 1974, Lande, 1996, Magurran 2004) deja evidencia de un sistema, con especies que presentan alta dominancia.

Las especies con mayor abundancia corresponden a *Microcystis cf. aeruginosa*, *Microcystis cf. wesenbergii*, *Limnoraphis cf. birgei*, *Gloeocystis sp.*, *Aphanocapsa cf. delicatissima*. *Aphanothece sp.* que podrían ser según Yount (1989) especies mejor adaptadas que prosperan más eficientemente en el sistema. Tomando en cuenta las etapas propuestas por Fontúrbel (2004), la composición de la comunidad del fitoplancton obtenido en el presente estudio sugiere una fase moderada a avanzada del proceso eutrófico, ya que existe una elevada abundancia de especies, pero con un bajo índice de diversidad, donde existe una evidente superioridad o predominio de algunos géneros.

Con respecto al estudio de estructura de la comunidad de fitoplancton, los análisis de similaridad y ordenamiento indicaron una comunidad homogénea. La variabilidad entre las distintas profundidades es muy baja lo que no permite establecer un patrón definido para cada profundidad haciendo que toda la comunidad fitoplanctónica se comporte de forma similar. Esto es igual en los distintos puntos de muestreo en el cual el análisis de similaridad indicó que no existe diferencias significativas entre los puntos de muestreo y el análisis de ordenamiento permitió observar que no hubo diferencias significativas en la composición y abundancia de la comunidad fitoplanctónica.

Algunos estudios indican que la homogeneidad en la estructura vertical y horizontal puede ser producto de la poca variación en la temperatura del agua (Varona- Cordero y Gutiérrez-Mendieta 2006, Ochoa y Tarazona, 2003) y de las estrategias empleadas por diferentes grupos de fitoplancton, para la absorción de los nutrientes disponibles en la columna de agua (Langlois y Smith, 2001). En ecosistemas endorreicos como es el caso del Lago de Coatepeque la ausencia de fuentes laterales de agua dulce y la mezcla turbulenta inducida por el viento durante la época seca son considerados factores que modulan la estructura vertical y horizontal en el cuerpo de agua (Herrera *et al.* 1999).

La variación temporal según al análisis de similaridad y ordenamiento evidencio que existen diferencias significativas entre la época seca y lluviosa. De acuerdo a lo expuesto por Gonzales en 1988 la respuesta de estos organismos fitoplanctónicos son evidentes en los cambios ambientales anuales en latitudes tropicales donde la luz y la temperatura son relativamente constantes en el transcurso del año, las variaciones estacionales dependen de la precipitación y la época de estiaje.

En estudios realizados en el Lago Atitlán, Amatitlán y Yojoa también se reconoce *Limnoraphis cf. birgei*, *Microcystis cf. aeruginosa*, *Gloeocapsa sp.*, *Aphanocapsa cf. delicatissima*, como especies con una alta dominancia durante la época lluviosa y seca (López *et al.* 2015, Hernández Oviedo *et al.* 2017, Salazar-Alcaraz *et al.* 2021). La especie *Oocystis solitaria* ha sido registrada con una alta contribución solamente en lagos urbanos García-Rodríguez *et al.* 2014 y Oliva *et al.* 2008.

La clasificación de rasgos y grupos morfológicos de Kruk *et al.* (2010) demostró ser objetiva, la cuantificación de los rasgos continuos y categóricos de los organismos en cada

ambiente fue coherente con los supuestos que definen los grupos morfológicos. En este estudio se encontraron seis de los siete grupos propuestos; los cuales fueron I, III, IV, V, VI y VII y sus principales variaciones se observaron a nivel temporal. Los grupos con mayor contribución a la disimilitud entre la época seca y lluviosa fueron IV, V, VI y VII.

Los grupos con mayor contribución a la similaridad en la época lluviosa corresponden al grupo IV, V, VI y VII. Los grupos con mayor contribución a la similitud durante la época seca corresponden a V, IV, VII y VI.

En este estudio los grupos funcionales de fitoplancton con mayor importancia corresponden el grupo III y VII debido a la dominancia de las especies *Limnorphis cf. birgei*, *Microcystis cf. aeruginosa* y *Microcystis cf. wesenbergii*; especies con propiedades boyantes debido a la presencia de aerotopos o vesículas de gas descritas como estructuras cilíndricas proteicas, huecas pero rígidas, que están ubicadas en el citoplasma que les permiten regular la posición vertical en la columna de agua, mediante el llenado de gas de estas estructuras (Reynolds *et al.* 1987, Oliver y Ganf 2000, Reynolds 2007). Dentro de las ventajas fisiológicas que confiere tener aerotopos están; el acceso a las capas superficiales más iluminadas y a las capas más profundas, ricas en nutrientes, sobre todo en aguas que están verticalmente estratificadas (Oliver y Ganf 2000). El grupo VII, compuesto por colonias mucilaginosas, es poco vulnerable a la sedimentación y a la herbivoría (Reynolds 2007). Rasgo exitoso en el lago de Coatepeque dada la alta frecuencia de ocurrencia de estos organismos.

Además, si se considera la clasificación de Reynolds *et al.* (2002), estos grupos predominantes están principalmente asociados con una alta disponibilidad de luz, hábitats poco profundos y con columnas de aguas ricas en nutrientes. Los dos grupos son susceptibles a la mezcla profunda o prolongada. Este grupo puede convertirse en un problema serio debido a que causa floraciones potencialmente tóxicas (Ferber *et al.* 2004, Kruk *et al.* 2010).

De acuerdo a resultados el grupo IV corresponde a organismos de tamaño medio, sin rasgos especializados y con moderada tolerancia a la limitación de nutrientes y luz; presentan pérdida por sedimentación baja a moderada y, debido a su tamaño medio, son los más vulnerables a la herbivoría.

Según Kruk y Segura 2012 e Izaguirre *et al.* 2012. La baja ocurrencia del grupo IV (organismos con tamaño medio y ausencia de rasgos especializados) evidencia el efecto que tiene la turbidez sobre las adecuaciones morfológicas del fitoplancton, pues estos grupos requieren de altas transparencias para su desarrollo y en general son favorecidos por condiciones oligotróficas a mesotróficas.

Por otra parte, en el lago de Coatepeque de acuerdo a lo propuesto por Sterner y Elser 2002, Hamm *et al.* 2003 y Kruk *et al.* 2010, la presencia del grupo VI (organismos no flagelados con exoesqueleto de sílice) en la zona fótica probablemente se relaciona con la presencia de diatomeas de origen perifítico o del fitoplancton que pueden ser transferidas por las corrientes de la zona fótica desde la región litoral a la limnética; los organismos no flagelados y con exoesqueletos de sílice del grupo VI tienden a sedimentarse rápidamente debido a su alta densidad celular y a la falta de movilidad, sin embargo, las paredes silíceas les confieren ventajas frente a ciertos herbívoros.

En lago de Coatepeque las especies que forman parte del grupo I son poco frecuentes y abundantes a pesar de ser especies pequeñas con una alta tasa de crecimiento y estar bien adaptados a la rápida adquisición de recursos y disminución de las pérdidas por hundimiento sus especies son valiosas para el pastoreo y sus poblaciones puedan recuperarse rápidamente después del pastoreo en ambientes con alta demanda pueden ser poco abundantes (Reynolds 1984, Lehman 1991, Sommer *et al.* 2003).

En lago de Coatepeque el grupo V estuvo conformado en su mayoría por las especies *Gymnodinium sp.* y *Heterocapsa sp.*, su movilidad permite una búsqueda eficaz de nutrientes que, junto con la producción de quistes, podría aumentar la tolerancia de condiciones de bajos nutrientes. Las especies de este grupo rara vez representan una seria amenaza a la calidad del agua. Incluso se ha comprobado que pueden favorecer a las poblaciones de sus depredadores por ejemplo el copépodo *Eurytemora*, lo que propicia una mayor tasa de reclutamiento de peces juveniles (Millete *et al.* 2015).

La clasificación de la comunidad de fitoplancton del lago en grupos morfo-funcionales puso de manifiesto que la diversidad funcional es una herramienta muy útil que permite caracterizar de forma adecuada a la comunidad fitoplanctónica (Reynolds 1988, Reynolds *et al.* 2002, Salmaso y Padisák 2007). Estas clasificaciones tienen la ventaja de ser

más refinadas, pero requieren información sobre los rasgos que normalmente no son fáciles de obtener para todas las especies (Salmaso y Padisák 2007, Mieleitner *et al.* 2008). Estas herramientas pueden ser útiles a los ecólogos del fitoplancton y a los modeladores y encargados de controlar la calidad del agua para comprender y predecir la composición de las comunidades de fitoplancton según las condiciones de los ambientes acuáticos.

De acuerdo a los valores obtenidos de las variables físico-químicas del lago de Coatepeque la temperatura del agua en todo el sistema osciló entre los 22.5 °C y los 30 °C. similar al reportado por Olivares (2013) en lago de Ilopango cuyos datos oscilaron entre los 25 °C a los 30 °C. Los valores obtenidos durante el periodo de muestreo sugieren una leve estratificación térmica que en algunos lagos de origen volcánico de la región como los son el lago Amatitlán, Atitlán y Yojoa en diversos trabajos se evidencia una marcada la estratificación térmica y se ha observado en ellos la relación entre la variación hidrográfica estacional y la estacionalidad fitoplanctónica donde se sugiere una mayor cantidad de fitoplancton durante la estación lluviosas y de mezcla y una menor durante la más cálida y estratificada (Coulter 1963).

En el lago de Coatepeque debido a la baja variación de la temperatura en aguas superficiales y profundas ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) podría indicar que el calor logra distribuirse hacia las capas profundas del lago. Es probable que la acción del viento y otras fuerzas generadoras de turbulencia distribuyen el calor de la superficie a las capas profundas durante el día y la noche (Löffler 2004, Lampert y Sommer 2007, Roldán y Ramírez 2008). Permitiendo que esta estratificación pueda romperse muy fácilmente y pueda ser observada en momentos muy específicos.

Los valores de temperatura encontradas en el lago de Coatepeque asociadas con otros fenómenos como la estratificación térmica y cambios en la profundidad de la zona de mezcla, puede favorecer el desarrollo de cianobacterias con vesículas de gas. Lo que podría explicar la alta abundancia de algunas especies con estas características en el lago (Reynolds 2006, Oliver y Ganf 2000).

Por otra parte, el pH mantiene influencia sobre una gran cantidad de procesos bioquímicos asociados al crecimiento y el metabolismo de las microalgas, incluyendo la ionización de metabolitos bioquímicos, solubilidad, además de la biodisponibilidad de CO_2

y nutrientes (García *et al.* 2000, Craggs 2005, Heubeck *et al.* 2007, Park y Craggs 2010). Con respecto a los valores de pH del lago de Coatepeque fueron similares a los encontrados en el lago de Ilopango por Olivares (2013), datos que se encontraron dentro del valor óptimo de operación de 7.0 a 9.0 para el desarrollo de microalgas (Lavens y Sorgeloos 1996).

Según la OMS y los valores de TDS ideal para agua el lago presenta un sistema que varía de regular (600 – 900 ppm) a pobre o no recomendables (900 – 1,200 ppm). Este aumento en la carga de sólidos es de gran relevancia en lo concerniente a la calidad del recurso hídrico y el ordenamiento de las cuencas hidrográficas, ya que tiene una relación directa con la producción de sedimentos y la contaminación de las aguas (Restrepo *et al.* 2015, Restrepo y Escobar 2016).

A diferencia de lo reportado en otras investigaciones donde se observan gradientes espaciales, una relación de TDS con las variaciones temporales asociadas principalmente con el ciclo hidrológico que tienden a aumentar en la época lluviosa y a disminuir en la seca (Sierra 2011). En el lago de Coatepeque la variación de TDS no coincidió con el rango temporal ya que este presentó una disminución entre los meses de Julio 2017 a noviembre 2018, y un aumento en los meses de diciembre 2018 a junio 2018. Que pueden ser efectos de la variabilidad climática, de mínimas o fuertes precipitaciones durante el periodo de muestreo; a su sistema endorreico, su origen geológico, al proceso de erosión del suelo por la falta de cobertura vegetal en la ribera y laderas, producto de contricción y desarrollo urbano o uso de suelo para prácticas agrícolas y ganaderas (Balocchi y Brea 2010)

Según la clasificación del estado trófico con respecto a los valores de transparencia Mena (2016) clasifica al lago de Coatepeque como mesotrófico. Los datos obtenidos durante el monitoreo presentaron una transparencia promedio de 5.79 m. otros autores tales como Chalar (2007), Esteves (1998) y Esteves (1988) señalan que transparencias mayores a 1.6 m indican un ecosistema oligotrófico, si este parámetro se encuentra entre 1.6 y 0.8 m, indica que el sistema está en un estado de mesotrofia; y si se presentan valores menores a 0.8 m, el sistema se encuentra en un estado de eutrofia. Aunque existieron periodos con valores mayores y menores de transparencia el lago de Coatepeque debe considerarse como oligotrófico.

Es importante reconocer la variación de la transparencia asociada a las precipitaciones, la elevada carga de nutrientes y materia orgánica proveniente de escorrentía y contaminación humana y otros eventos como la incidencia de viento sobre la resuspensión en la época seca (Esteves 1998, Margalef 1981).

Para el lago de Coatepeque se determinó una correlación baja entre las variables físico-químicas y la comunidad fitoplanctónica dichos resultados sugieren que la temperatura es uno de los factores con mayor influencia; Wells *et al.* (2015), sugiere que es un parámetro que afecta a varios procesos metabólicos de organismos que producen floraciones algales. Este parámetro tiene una fuerte influencia en la presencia y trayectoria de la comunidad de fitoplancton. Sin embargo, no hay pruebas significativas que relacionan los cambios de temperatura con la producción de toxinas. Por otra parte, la transparencia, el pH, y la presencia de sólidos disueltos también contribuyen a la diferenciación de las comunidades de fitoplancton (Margalef 1983).

Aunque en este estudio no se obtuvieron datos de nutrientes Carlson (1977) y Toledo *et al.* (1983), consideran importante incluir cálculos de las concentraciones de fósforo total, ortofosfatos y nitrógeno total ya que se consideran como las variables directamente relacionadas con el estado trófico de los sistemas acuáticos.

Con respecto a los resultados obtenidos y los fenómenos de cambio de color documentados desde el 2006 al 2023 el presente estudio brinda información valiosa debido a que los cambios de color no concuerdan con las proliferaciones algales ocurridas entre julio 2017 a junio 2018.

Las características de proliferación algal producto de cianobacterias *Microcystis cf. aeruginosa*, *Microcystis cf. wesenbergii* y *Limnoraphis cf. birgei* son distintas a las observadas durante el periodo de cambio de color, en su lugar se observa la presencia de cristales de origen volcánico y concentraciones celulares de estas especies mucho menores que en meses anteriores.

VII. CONCLUSIONES

- Se determinaron un total de 99 especies correspondientes a 6 divisiones, 12 clases, 29 órdenes, 43 familias, 67 géneros. De las cuales la riqueza de especies estuvo dominada en un 41% por la división Bacillariophyta, el 36% a Cyanobacteria, el 17% a Chlorophyta, el 3% a Charophyta, el 2% a Miozoa y el 1% a Euglenozoa.
- Con respecto a los análisis de los estimadores de riqueza y análisis de curvas de acumulación. A pesar de no obtenerse una asíntota definida, las curvas presentaron pendientes suavizadas por lo que se considera que el muestreo es representativo de la diversidad potencial de la comunidad. Por lo tanto, la probabilidad de añadir especies nuevas al inventario es menor.
- La diversidad de fitoplancton del lago de Coatepeque evaluada por el índice de Shannon-Wiener osciló entre 0.1 y 1.9 bits ind⁻¹, con un promedio de 1.2 bits ind⁻¹ durante el periodo de muestreo. El índice de Simpson que mide tanto la dominancia como la riqueza obtuvo valores entre los 0.04 y 0.8 con un promedio de 0.5. g evidenciaron una baja diversidad.
- Con respecto a la época seca y lluviosa la dispersión de los valores del índice Shannon-Wiener y el índice de Simpson son similares, por lo que no es posible afirmar que una época sea más diversa que otra.
- Las especies de la comunidad fitoplanctónica con mayor abundancia promedio durante el periodo de muestreo corresponden a *Microcystis aeruginosa* con 171,839 cél/L, *Microcystis cf. wesenbergii* con 145,217 cél/L, *Cyanobium sp.* con 143,591 cél/L, *Limnoraphis birgei* con 131,516 cél/L.
- En el periodo de muestreo se presentaron 2 proliferaciones de cianobacterias que corresponden a los meses de agosto 2017 y mayo 2018. La mayor concentración celular en estos meses se observó en zona cercanas al castillo del Rey (P4) evento dominado por las especies por *Microcystis aeruginosa*, *Limnoraphis cf. birgei* y *Microcystis cf. wesenbergii*.
- La composición y abundancia de comunidad fitoplanctónica del Lago de Coatepeque no mostró diferencia entre los distintos puntos y profundidades de muestreo. Dichos

datos permiten definir a la comunidad de fitoplancton como homogénea con respecto a la profundidad y puntos de muestreo. Con respecto a la variación temporal, si se percibieron cambios en la época seca y lluviosa.

- La evaluación de los grupos morfo-funcionales en los distintos puntos y profundidades dieron como resultados similares al análisis de estructura tradicional, esto nos permite establecer lo útil que se vuelve el empleo de esta técnica de clasificación.
- Los datos de temperatura en los meses de época lluviosa sugieren una leve estratificación térmica que es más evidente en el mes de agosto 2017 con una diferencia de temperatura entre la superficie y la profundidad de 3 °C., marzo con una diferencia de 2.6 °C y mayo 2018 con una diferencia 2 °C.
- Se determinó que las variables físico-químicas y la comunidad fitoplanctónica presentan una correspondencia baja sin embargo se considera que la temperatura es la que mejor contribuye a la composición y abundancia del fitoplancton del lago de Coatepeque.
- De acuerdo a los resultados de este estudio los cambios de color del lago a turquesa no son producto de proliferaciones algales debido a que la composición y abundancia de especies durante este evento disminuye, observándose la presencia de cristales de origen volcánico en mayor concentración, además las proliferaciones algales detectadas presentan características totalmente diferentes a las observadas en el periodo de cambio de color.

VIII. RECOMENDACIONES

- Debido a la presencia de especies de cianobacterias potencialmente tóxicas se sugiere continuar el monitoreo de las contracciones celulares y algunas variables fisicoquímicas que permita generar alertas tempranas, campañas de concientización ante futuras proliferaciones algales nocivas.
- Futuros estudios deben considerar la reducción del esfuerzo de muestreo debido a las características en la distribución homogénea de la comunidad fitoplanctónica con respecto a los puntos de muestreo y las distintas profundidades evaluadas.
- Profundizar en estudios que incluyan la medición de clorofila y nutrientes tales como el fósforo, el nitrógeno y sus derivados que permitan progresar en el estudio de eutrofización.
- Profundizar el análisis del picoplancton y nanoplancton del lago de Coatepeque
- Incentivar el uso de tecnología satelital para el monitoreo de eventos de proliferaciones algales en ecosistemas de agua dulce.
- Debido a las características geológicas del lago de Coatepeque se sugiere antes de cualquier expedición científica evaluar las condiciones atmosféricas que permitan una navegación segura.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguillón C. 1995. Relación del fitoplancton con la calidad físico-química del agua de la zona 1 distrito de riego de Zapotitán. Trabajo de graduación Licenciatura. El Salvador. (SS): Universidad de El Salvador. 230 p.
- Alcocer J, Merino-Ibarra E y Escobar B. 2015. Tendencias de investigación en Limnología tropical. Asociación Mexicana de Limnología, A.C. grupo editorial, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM) y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México 482 p.
- Alemán A y Guerrero E. 2006. Evaluación de la calidad del agua en el lago de Coatepeque en el periodo de junio-agosto de 2006. Trabajo de graduación de Licenciatura. El Salvador (SS): Universidad de El Salvador. 197 p.
- Almanza V, Parra O, Bicudo C, Sant'Anna C, Figueroa R, Roberto Urrutia P, Lara S, Beltrán C. 2016. Guía para el estudio de cianobacterias en el sistema lacustre de Gran Concepción: aspectos ecológicos, toxicológicos, de control-vigilancia y taxonómicos. Trama Impresores S.A. Hualpén, Concepción, Chile. 100 p.
- Altamirano M, Flores-Moya A, Figueroa FL. 2003. Effects of UV radiation and temperature on growth germlings of three species of *Fucus* (Phaeophyceae). *Aquat. Bot.* 75: 9–20.
- Alvarado V. 2003 Dinámica Estacional y Circadiana del Fitoplancton en el Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michacán. 124 p.
- Álvarez M, Córdoba S, Escobar F, Fagua G, Gast F, Mendoza H, Ospina M, Umaña AM, Villareal H. 2006. Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de la biodiversidad. 2ª edición. Colombia (Bogotá): Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 236 p.
- Álvarez T. 2015. Catálogo y claves de identificación de organismos fitoplanctónicos utilizados como elementos de calidad en las redes de control del estado ecológico.

- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría General Técnica. Madrid. España. 559 p.
- Álvarez-Covelas, M y B, A. Jacobsen. 1992. Fitoplancton hipertrófico: una descripción general. *Foro de agua dulce* 2: 184-199.
- Anderson, D.M., P. Andersen, V.M. Bricelj, J.J. Cullen & J.E. Rensel. 2001. Monitoring and Management Strategies for Harmful Algae Blooms in Coastal Waters, APEC #201-MR-01.1, Asia Pacific Economic Program, Singapore, and Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series No. 59, Paris. 230
- Asprey, G.F., K. Benson-Evans & J.E. Furet. 1964. A Contribution to the Study of South American Fresh-water Phytoplankton. *Gayana Botanica* 10: 1-18, 2 Pls
- Aubriot L, Bonilla S y Kruk C. 2009. Cianobacterias: factores que regulan su crecimiento, en Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. 5-11 p.
- Balocchi, F., & Brea, J., 2010 Procesos de erosión- sedimentación en cauces y cuencas, Organización de las Naciones Unidas para la Educación (UNESCO).
- Banderas, T.A. y R Gonzales V. 1988. Limnología de El Sol, un Lago Alpino Tropical En De la Lanza E. G. Y J. L. Garcia C. 2002. Lagos y presas de México. AGT Editor. México. 63 a 79 pp.
- Bandera-Tarabay A.G. 1997. Phycoflora of the tropical highmountain lake El Sol Central Mexico and some biogeographical relationships. *Hydrobiologia*. 354: 17 a 40 pp.
- Bañares E, Altamirano M, Figueroa FL, Flores–Moya A. 2002. Influence of UV radiation on growth of sporelings of three non–geliculate coralline red algae from southern Iberian Peninsula. *Phycol. Res.* 50: 23–30.
- Bartram J y Ballance R. 1996. Monitoreo de la calidad del agua: Una guía práctica para El diseño de estudios de calidad de agua dulce y programas de monitoreo. Chapman Hill. Londres 383p.

- Becerra Absalón, I., & Tavera, R. (2003). Cambios de la comunidad algal (Perifiton) relacionados con el ciclo hidrológico en un tinal anegable en Quintana Roo. *Mexican Studies/Estudios Mexicanos*, 19(2), 263–275.
- Benjumea C y Wills Á. 2007. Evaluación de la estratificación térmica y su relación con el oxígeno disuelto del agua en la ciénaga Cachimbero, municipio de Cimitarra, Santander. *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*. (41): 48-65.
- Bold H y Wynne M. 1985. *Introduction to the algae: Structure y Reproduction*. [Introducción a las algas: estructura y reproducción]. Prentice-Hall. Inc. EnglewoodCliffs, New Jersey. 572 p.
- Bort S, Rojo C, Rodrigo M y Maidiana N. 2005 El fitoplancton de Laguna de Ruidera (Parque Natural Ciudad Real. España). *Asociación Españolas de Limnología. Limnética*. 24 (1-2): 33-46 p.
- Botes L. 2003. *Phytoplankton Identification Catalogue*. [Catálogo de identificación fitoplancton]. Saldanha Bay, S. GloBallast (7): 88.
- Bouza C y Covarrubias D. 2005. Estimación del índice de diversidad de Simpson en “m” sitios de muestreo. *Revista investigaciones operacionales*. 26 (2): 187-197.
- Brower, J. E. y J. H. Zar. 1984. *Field and laboratory methods for general ecology*. Wm. C. Brown Co. Dubuque, Iowa. 226 p.
- Calderón P y Alzamora L. 2011. *Estadística Para la Tesis de Postgrado*. Internacional Inglaterra. Lima, Perú. 137 p.
- Carballo G. 1990. *Análisis de plancton y zooplancton en el Rio Belém*. Distrito de riego, Zapotitán trabajo de graduación. El Salvador (SS): Universidad de El Salvador. 85 p.
- Cardenal R, Roque-Baldovinos R, Bahamond A, Cáceres G, Campos AH, Cañas-Dinarte C, González LA, Martí M, Peraza X, Rodríguez-Díaz R, et al. 2000. *Enciclopedia de El Salvador: Tomo I*. España (Barcelona): Grupo editorial OCEANO. 224 p
- Carlson, R.E. 1977. A trophic date index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 22: 361-369.

- Carmona J, Hernández M y Ramírez M. 2004. Algas Glosario Ilustrado. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México. 87 p.
- Carvajal G. 2011. Ocurrencia de floraciones de cianobacterias toxicas en cuerpos de agua Dulce, argentina. Trabajo de graduación. Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 179 p.
- Chalar, G. 2007. Dinámica de la Eutrofización a Diferentes Escalas Temporales: Embalse Salto Grande (Argentina-Uruguay). Ed. J. Galicia Tundisi, T. Matsumura Tundisi & C. Sidagis Galli (eds.). São Carlos, SP, Brasil. pp. 87-101.
- Clarke, K. R., Clarke, K. R., Gorley, K. N., Clarke, K., & Gorley, R. 2006. PRIMER v6: user manual/tutorial (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research). PRIMER E, Plymouth.
- Clarke, KR 1993. Análisis multivariado no paramétrico de cambios en la estructura de la comunidad. Revista australiana de ecología 18: 117-143
- Clausen, R. G. 1936. Oxygen consumption in freshwater fishes. Ecology 17: 216-226.
- Colato A. 1996. Contribución al Conocimiento de las Pyrrophyta y Cyanochlorontas Planctónicas, en el Sector Oriente de la Bahía de Jiquilisco, Trabajo de graduación. El Salvador (SA): Universidad de El Salvador. 77 p.
- Correa C, Iral R y Rojas L. 2006. Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Estadística. Revista Colombiana de Estadística. Medellín. Colombia. (29): 57-76.
- Costa L, Huszar V y Ovalle A. 2009. Phytoplankton Functional Groups in a Tropical Estuary: Hydrological Control and Nutrient Limitation [Grupos funcionales de fitoplancton en un estuario tropical: control hidrológico y limitación de nutriente]. Costas y Estuarios. (32): 508-521.
- Dale, V. H. & Beyeler, S. C., 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. Ecological Indicators, 1: 3–10.

- De la Lanza E, Hernández P y Carbajal P. 2000. Organismos Indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores). Plaza y Valdés. México. 633 p.
- De le Parra G y Rodelo K. 2011. Composición y abundancia de la comunidad de algas perifíticas del río Cesar asociado a variables físico-químicas e hidrológicas durante los meses de febrero- septiembre del año 2011. Cesar, Colombia. 87 p.
- De León L. 2000. Características de la comunidad fitoplanctónica de un embalse subtropical Salto grande (Uruguay-Argentina). Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas. Universidad de Concepción. Uruguay. 15 p.
- Dimas L. 2005. La situación del recurso hídrico en El Salvador. (SS). Boletín. (235): 8.
- Dokulil T y Teubner T. 2003. Steady-state phytoplankton assemblages during thermal stratification in deep alpine lakes [Conjuntos de fitoplancton de estado estacionario durante la estratificación térmica en lagos alpinos profundos]. *Hydrobiologia*. (502): 65–72.
- Dorador, C., Pardo, R.; Vila, I. 2003, Variaciones temporales de parámetros físicos, químicos y biológicos de un lago de altura: el caso del lago Chungará. *Revista Chilena de Historia Natural* 76:15-22.
- Dreckmann K, Santíes A y Núñez M. 2013. Manual de prácticas de laboratorio. Biología de algas. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. México Printed in México. 90 p.
- Espinoza J, Amaya O y Quintanilla R. 2013. Atlas de fitoplancton Marino. Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de El Salvador. El Salvador (SS). 100 p.
- Esteves F, 1988. Aplicacao de tipología de lagos temperados a lagos tropicais. *Acta. Limnologia Bras.*, 2. Esteves, 1998. Fundamentos de limnología. Segunda edición. Rio de Janeiro. Editora Interciencia Ltda
- Esteves, F.1988. Fundamentos de Limnología. Interciencia. Rio de Janeiro. 575 pp.
- Fernández R, Domínguez J y Trapero A. 2010 Consejería de Agricultura y Pesca Servicio de Publicaciones y Divulgación, Sevilla. España. 349 p.

- Ferrario M, Sar E y Sala S. 1995. Metodología básica para el estudio de fitoplancton con especies referencia a las diatomeas. Departamento Científico de Ficología Facultad de Ciencias y Naturales y Museo Paseo del Bosque s/n, 1900. La Plata, Argentina. 20 p.
- Figueroa FL, Viñegla B. 2001. Effects of solar UV radiation on photosynthesis and enzyme activities (carbonic anhydrase and nitrate reductase) in marine macroalgae from southern Spain. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 74: 237–249
- Flores A. 1996. Contribución al Conocimiento de las Cyanochlorontas y Pyrrhophycophyta Planctónicas, durante la estación lluviosa 1994 en el sector poniente de la Bahía de Jiquilisco. Trabajo de graduación de Licenciatura. El Salvador (SA): Universidad de El Salvador. 48 p.
- Forero L, Longo M, Ramírez J y Chalar G. 2014. Índice de calidad ecológica con base en macro-invertebrados acuáticos para la cuenca del río Negro (ICERN-MAE), Colombia. *Revista de Biología Tropical.* 62 (2): 233-247.
- Gallo M, Rodríguez E, Villacorta R, Molina M y Soley R. 2007. Reserva de la Biosfera Apaneca-Ilamatepec. El Salvador C.A. UNESCO-Programa el Hombre y la Biosfera (MAB). 60 p.
- García-Rodríguez, J, Molina-Astudillo, F. I., Miranda-Espinoza, E., Soriano-Salazar, M. B., & Díaz-Vargas, M. (2015). Variación fitoplanctónica en un lago urbano del municipio de Cuernavaca, Morelos, México. *Acta universitaria*, 25(1), 03-11.
- Gaysina, L. A., Saraf, A., & Singh, P. (2019). Cyanobacteria in Diverse Habitats. *Cyanobacteria*, 1–28.
- Gerber S, Häder DP. 1993. Effects of solar radiation on motility and pigmentation of 3 species of phytoplankton. *Env. Exp. Bot.* 33(4): 515–521.
- Giannuzzi L. 2009. Cianobacterias y cianotoxinas: identificación, toxicología, monitoreo y evaluación de riesgo. Buenos Aires. Argentina (238): 37-52.
- Giannuzzi L. 2011. Cianobacterias como determinantes ambientales de la salud. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Salud de la Nación. 164 p.

- González G. 2013. Fracciones de tamaño de fitoplancton de las lagunas de la turbera de Rancho Hambre (Tierra del Fuego): caracterización y relación con los factores bióticos y abióticos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires 145 p.
- González J, De la Fuente A, Hernández–Santín L, Buzo–Franco D y Bonache–Regidor C. 2013. Evaluación de estimadores no paramétricos de la riqueza de especies. Un ejemplo con aves en áreas verdes de la ciudad de Puebla, México. *Animal Biodiversity and Conservation* 33(1): 30-45 p.
- Gotelli N y Colwell R. 2001. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters* (4): 379-391.
- Graham L, Wilcox L y Graham J. 2009. Algas. 2a segunda edición, Nueva Jersey: Prentice Hall. 97-131 p.
- Graham, L. E., Wilcox, L. W. y Graham, J. (2016). *Algae*. (3rd ed.), San Francisco: Pearson Education Inc., Pearson Benjamin Cummings.
- Grime J. 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*. (3): 1169- 1194.
- Guardado J. 2012. Caracterización de Proyectos Sobre Manejo de Recursos Forestales en El Salvador. Iniciativa de Cuenca de Lago de Coatepeque para la Regulación Hídrica. El Salvador. (SS). 115 p.
- Guerrero F y Ramírez J. 2012. El análisis de escalamiento multidimensional: una alternativa y un complemento a otras técnicas multivariantes. Departamento de Economía y Empresa. Universidad Pablo de Olavide. Sevilla. España. 11 p.
- Guiry M y Guiry G. 2017. AlgaeBase. Publicación electrónica mundial, Universidad Nacional de Irlanda, Galway. [Http:// www. Algaebase.org](http://www.Algaebase.org). [en línea 19 de mayo de 2017].

- Hernández J. 2010. Reserva de la biosfera su contribución a la provisión de servicios de ecosistemas. Experiencias positivas. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO). Chile. 87-100 p.
- Hernández Oviedo, A. I., Marin, M., Henriquez, L. y Garay, M. (2017) «Variación espacial y temporal de la diversidad y abundancia del fitoplancton del lago de Yojoa en un año hidrológico 2014-2015», Revista Ciencia y Tecnología, (19), pp. 40–77.
- Hernández R. 1973. —Contribución al conocimiento Limnológico del Lago de Güijal. Trabajo de graduación Ing. Agr. El Salvador, Universidad de El Salvador, 92 p
- Hernández-Morales R, Ortega M, Sánchez J, Alvarado R y Aguilera R. 2011. Distribución estacional del fitoplancton en un lago cálido monomíctico en Michoacán México. *Biológicas*. 13(2): 21-28.
- Hernández-Morales, R., Ortega-Murillo, M.R., Alvarado Villanueva, R., Sánchez-Heredia, J.D. & Medrano-Zarco, F. 2008. Variación anual del fitoplancton en el lago cráter La Alberca de Tacámbaro, Michoacán, México. *Biológicas*, 10, 5- 17.
- Herrera-Silveira, J., Martín, M. & Díaz-Arce, V. (1999). Variaciones del fitoplancton en cuatro lagunas costeras del Estado de Yucatán, México. *Rev. Biol. Trop.*,47(1), 47-56.
- Horne, J.; Goldman, Ch. 1994, *Limnology*. Mc Graw-Hill. 576 pp.
- Howel W y Meyer H. 1954. Historia Volcánica del Lago de Coatepeque y sus alrededores. El Salvador. (SS). *Comunicaciones* (3): 2-3.
- Hustedt P. 1953. Algunas observaciones sobre la vida de microorganismos en los arroyos termales de los ausoles de El Salvador. *Comunicaciones*. 2 (5-6): 103-108.
- Huszar V y Reynolds C. 1997. Phytoplankton periodicity and sequences of dominance in an Amazonian floodplain lake (Lago Batata, Pará, Brazil): Responses to gradual environmental change. *Hydrobiologia*. (346): 169-181.

- Huszar V, Silva L, Marinho M, Domingos P, y Sant'Anna C. 2000. Cyanoprokaryote assemblages in eight productive tropical Brazilian waters [Ensamble de cianobacterias en ocho aguas productivas tropicales brasileña]. *Hydrobiologia*. (424): 67-77.
- Ibáñez B. 2010. *Apuntes de Bioestadística*. Escuela Universitaria de enfermería del Sagrado Corazón. Castellón. España. 71 p.
- Komárek, J., Kastovsky, J., Mares, J., & Johansen, J. 2014. Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera) 2014, using a polyphasic approach. *Preslia* 86:295-335.
- Korbee N, Figueroa FL, Aguilera J. 2005. Effect of light quality on the accumulation of photosynthetic pigments, proteins and mycosporine-like amino acids in the red alga *Porphyra leucosticta* (Bangiales, Rhodophyta). *J. Photochem. Photobiol.* 80: 71–78.
- Kruk C, Huszar V, Peeters E, Bonilla S, Costa L, Lurling M, Reynolds C, Scheffer M. 2010. Morphological classification capturing functional variation in Phytoplankton [Clasificación del fitoplancton a través de la variación de grupos morfológicos] *Freshwater Biology*. (55):614-627.
- Kruk C, V. L. M Peeters, Van Nes E, Huszar V, Costa L y Scheffer M. 2011. Phytoplankton community composition can be predicted best in terms of morphological groups [La composición de la comunidad fitoplanctónica puede predecirse mejor en los grupos morfológicos]. *Limnología y Oceanografía*. (56): 12
- Lamas G., Robbins R. K y Harvey D. J. 1991. A preliminary survey of the butterfly fauna of Pakitza, Parque Nacional del Manu, Peru, with an estimate of its species richness. *Publ. Mus. Hist. nat. UNMSM (A)*, 40: 1-19.
- Lamper, W. & U. Sommer. 2007. *Limnoecology*. Oxford University Press, Oxford, Great Britain. 335pp.

- Lande, R. 1996. Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *OIKOS* 76: 5-13.
- Langlois, G. W y P. Smith (2001): Phytoplankton In: *Biology and Ecological Niches in the Gulf of the Farallones*: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 32-35.
- Lara-Rodríguez Velásquez-Arenas R, Troccoli L, Hernandez D y Lemus M. 2015. Variación temporal de las variables físico-químicas y biomasa fitoplanctónica en aguas superficiales de la zona costera de Chacopata, NE Venezuela (Mar Caribe) *Revista de Biología Marina y Oceanografía* (50) 2: 367-373.
- Lavens P & P Sorgeloos. 1996. Manual on the production and use of live food for aquaculture, 13 pp. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Legendre P. & Gallagher E. D. 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129: 271-280.
- León C. 2009. Estandarización y validación de una técnica para medición de la demanda bioquímica de oxígeno por el método respirométrico y la demanda química de oxígeno por el método colorimétrico. Trabajo de graduación. Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Tecnología Escuela de Tecnología Química. Colombia. 103 p.
- Lewis W. 1978. Dinámica y sucesión del fitoplancton en un lago tropical: Lago Lanao, Filipinas. *Revista de Ecología*. (66): 849-880.
- Litchman E y Klausmaier C. 2008. Trait-Based Community Ecology of Phytoplankton [Ecología comunitaria basada en rasgos del fitoplancton]. *Revisión Anual de Ecología Evolución y Sistemática*. (39): 615-39.
- Löffler, H. 2004. The origin of lake basins, p. 8- 60. In P.E. O'Sullivan & C. S. Reynolds (Eds.). *The lakes handbook*. Blackwell Science Ltd., Cornwall, United Kingdom
- López Estrada M E. Estructura, composición y dominancia de las cianobacterias en el lago de Amatitlán, Guatemala y su relación con la pérdida de diversidad de

fitoplancton [tesis Químico Biólogo]. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia; 2015.

López J y Méndez A. 2013. Evaluación de la concentración de los grupos de fitoplancton: Diatomeas, Cianofitas, Clorofitas y Dinoflagelados y su relación con los parámetros fisicoquímicos, en las aguas del Río Estero Real, período junio-noviembre de 2013. Trabajo de graduación. Facultad de Ciencias y Tecnología “Departamento de Biología “Edgar Munguía Álvarez” Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. 82 p.

López J. 2005. Análisis ambiental del proyecto servicios ambientales del manejo integrado de ecosistemas en El Salvador. San Salvador (ES). 41 p.

López S y Catzim L. 2010. Capítulo 4: Microalgas Dulceacuícolas. Centro de Investigación Científica de Yucatán. México. Seduma. (80): 165-166.

López-Gómez A y Williams-Linera G. 2006. Evaluación de métodos no paramétricos para la estimación de riqueza de especies de plantas leñosas en cafetales. Boletín de la Sociedad Botánica de México. (78): 7-5.

Lugo A, Gonzáles M, Sánchez R y Alcocer J. 1999. Distribución de *Leptodiptomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoida) en un lago hiposalino mexicano. *Biología Tropical*. 47 (1): 141 – 148.

Lund J, Kipling C y Le Cren E. 1958. The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting [El microscopio invertido, método numérico de estimación de algas y las bases estadísticas para las estimaciones de conteo]. *Hydrobiologia* (11): 143-70.

MacArthur R y Wilson E. 1967. *The theory of island biogeography*. Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press. 224 p.

MAG. 2002. Ministerio de Agricultura y Ganadería El estudio sobre el desarrollo de la pesca artesanal en El Salvador, San Salvador (ES). 263 p.

- MAG. 2012. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Clasificación de suelos por división política de El Salvador, C.A. El Salvador (Soyapango): Ministerio de Agricultura y Ganadería. 86 p.
- Magurran, A. 2004. Measuring biological diversity. Blackwell Science Ltd. 256 pp.
- Maidana N y Seeligmann C. 2006. Diatomeas (Bacillariophyceae) de ambientes acuáticos de altura de la Provincia de Catamarca, Argentina II. Sociedad Argentina de Botánica. Córdoba. (41): 1-2.
- Margalef R. 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica*. (1): 493-509.
- Margalef R. 1983. *Limnología*. Omega. Barcelona, España. 1010 p.
- Margalef R, Planas D, Armengol J, Vidal A, Prat N, Guiset A, Toja J y Estrada M. 1976. *Limnología de los embalses españoles*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas. Madrid. 452 p.
- Margalef, R. 1981. *Ecología*. Editorial Planeta. Barcelona. 252 pp.
- MARN. 2006. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Informe de evaluación de calidad de agua del Lago de Coatepeque. El Salvador. (SA). 15 p.
- MARN. 2012. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales Informe de Evaluación de Floración de Microalgas en el Lago Coatepeque. El Salvador. 11 p.
- MARN. 2015. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Informe de Evaluación de Floración de Microalgas en el Lago Coatepeque. Santa Ana, El Salvador 10 p.
- MARN. 2016. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales Informe de Evaluación de Floración de Microalgas en el Lago Coatepeque. El Salvador. 10 p.
- Martínez A y Castro G. 2012. Abundancia y distribución de las microalgas presentes en los ríos; Lempa tramo Citalá y Bocatoma de la planta potabilizadora Las Pavas de ANDA y desagüe durante los meses de mayo a julio 2011. Trabajo de graduación, Santa Ana (ES): Universidad de El Salvador. 55 p.

- McIntire, CD, Larson, GL & Truitt, RE, 2007. Variabilidad estacional e interanual en la composición taxonómica y dinámica de producción de ensamblajes de fitoplancton en Crater Lake, Oregon. *Hidrobiología* 574, 179–204.
- Mediana D. 2016. Estado Actual de la Limnología en Colombia Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Ciencias y Educación. Trabajo de graduación. Bogotá D.C. Colombia. 37 p.
- Menjívar R. 1985. Avances sobre un Inventario de Diatomeas presentes en La Bahía de Jiquilisco. Trabajo de graduación Licenciatura. El Salvador. Universidad de El Salvador. (ES). 133 p
- Monterrosa J y Gutiérrez A. 1992. Estudio del plancton y algas bentónicas del Río Talnique. El Salvador (SS): Universidad de El Salvador. 51 p.
- Monterrosa J. 1992. Caracterización de algas, protozoos e insectos acuáticos presentes en las comunidades planctónicas y bentónicas en aguas del Río chagüite (afluente del lago de Ilopango) El Salvador. Trabajo de graduación. El Salvador (SS): Universidad de El Salvador. 262 p.
- Montoya-Moreno Y, Sala S, Vouilloud A, Aguirre N y Plata-Díaz Y. 2013. Lista de las Diatomeas de ambientes continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander Von Humboldt". *Biota Colombiana*. Colombia. 14(2): 13-76.
- Mora E. 2015. Composición del fitoplancton y relaciones especies-área de cinco sistemas lacustres en los Tuxtlas, Ver., México. Universidad Veracruzana Centro de Investigaciones Tropicales. 87 p.
- Mora P. 2011. Comparación de la morfología Funcional del fitoplancton y su relación con factores físico-químicos en el primer periodo del 2007 y 2011 en el tercio alto del humedal Juan Amarillo. Pontifica Universidad Javeriana. Bogotá D.C. Colombia. 59 p.

- Mora-Navarro M, Vázquez-García J y Vargas-Rodríguez. 2004. Ordenación de comunidades de fitoplancton en el lago de Chapala, Jalisco Michoacán, México *Hidrobiológica* (14): 91-103.
- Moreno C. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T–Manuales y Tesis SEA, vol.1. Zaragoza, 84 p.
- Muñoz-López L, Aranguren-Riaño N y Duque S. 2017. Morfología funcional del fitoplancton en un lago de alta montaña tropical: Lago de Tota (Boyacá-Colombia) *Biología tropical*. 65 (2): 669-683.
- Nezan E, Piclet G y Grossel H. 1997. Guide pratique à l'usage des analystes du Réseau National de Surveillance du phytoplancton [Guía práctica para la utilización de los análisis de la red nacional de vigilancia del fitoplancton]. 31 p.
- Nogueira L. 2011. Determinación de grupos morfo-funcionales fitoplanctónicos en el Río de la Plata. Sección Limnología y Oceanología. Montevideo. 42 p.
- Novelo E. 2012. Chlorophyta. Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México. *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán* (94): 1- 89.
- Novelo E. 2012. Bacillariophyta. Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México. *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán* 102: 1-200.
- Novelo E. 2014. Euglenophyta. Instituto Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México. *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán* (117): 1-13.
- Ochoa, N. y J. Tarazona (2003): Variabilidad temporal de pequeña escala en el fitoplancton de Bahía Independencia, Pisco, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 10: 59- 66
- Oliva, M. M. G. 2001. Estudio de la Variación Vertical Y temporal de las Comunidades Fitoplanctonicas Durante el Florecimiento de cianofíceas en el Lago Cráter Alchichica, Puebla. Tesis de Maestría, Fac. de Ciencias Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 134 pp.

- Oliva, M. M. G., Rodríguez, R. A., Lugo, V. A. & Sánchez, R. M. R. 2008. Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico. *Hidrobiológica*, 18, 1-13.
- Oliva-Martínez M, Godínez-Ortega J y Zúñiga-Ramos C. 2014. Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales en México. Facultad de Estudios Superiores-Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista Mexicana de Biodiversidad*. (85): 54-61.
- Oliva-Martínez, Godínez-Ortega, Andrea Zúñiga-Ramos, 2014. Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales en México, *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Volume 85, Supplement 1, 2014, Pages 54-61, ISSN 1870-3453,
- Olivares P. 2013. Composición y abundancia de cianobacterias (*Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*) en el lago de Ilopango. El Salvador. Trabajo de graduación Licenciatura, San Salvador (ES): Universidad de El Salvador. 86 p.
- Olivares Pavez A P. Abundancia y distribución de cianobacterias (*Microcystis* sp, *Anabaena* sp, *Oscillatoria* sp) en el lago Ilopango, el Salvador [tesis Licenciatura en Biología en línea]. San Salvador: Universidad El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Escuela de Biología; 2013.
- Oliver R y Ganf G. 2000. The ecology of cyanobacterias. [Ecología de cianobacterias] Universidad de Durham. Departamento de biología. Academia Kluwer. Virginia, USA). 149-94 p.
- Oliver, R. y Ganf, G. 2000. Flores de agua dulce. En: Whitton, B. y Potts, M., Eds., *The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space*, Kluwer Academic Publishers, Países Bajos, 149-194.
- OMS. 2003. Directrices para entornos seguros de agua recreativa. Volumen 1, Aguas Costeras y Dulces. Organización Mundial de la Salud.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. 2008. Cultivo de bivalvos en criadero. Un manual práctico. Documento técnico de pesca.

- Tercera parte. Servicio de Recursos de Aguas Continentales y Acuicultura. Dirección de Recursos Pesqueros. Roma, Italia. 42 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. 2009. Cianobacterias Planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Uruguay. Documento Técnico. PHI-LAC. (16): 105.
- Ortez L. 2014. Diagnóstico de las poblaciones de cianobacterias y microalgas presentes en el proceso de potabilización en La Planta Las Pavas (ANDA), Municipio de San Pablo Tacachico, La Libertad. Trabajo de graduación. Santa Ana (ES): Universidad de El Salvador. 130 p.
- Panilla G. 2005 Ecología del fitoplancton de un lago amazónica de aguas claras (Lago Boa Caquetá Medio Republica de Colombia) Facultad de Biología Marina. Universidad de Bogotá. 258 p.
- Parra O y Bicudo C. 1996. Algas de Aguas Continentales: Introducción a la Biología y Sistemática. Ediciones Universidad de Concepción. 268 p.
- Parra O, González M, Dellarossa V, Rivera P y Orellana M. 1982 Manual taxonómico del fitoplancton de agua continental con especial referencia al fitoplancton de Chile. Universidad Concepción. Chile. Concepción. 98 p
- Parra O. 2006. Estado de conocimiento de las algas dulceacuícolas de Chile (Excepto Bacillariophyceae). Unidad de Sistemas Acuáticos, Centro de Ciencias Ambientales, Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, Chile. *Gayana*. 70(1): 8-1.
- Peet, R. 1974. The Measurement of Species Diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 5:285-307.
- Peña A. 1995. Abundancia de Diatomeas Planctónicas en el Sector Poniente de la Bahía de Jiquilisco. Trabajo de graduación de Licenciatura. El Salvador. (SA): Universidad de El Salvador. 62 p.

- Peña E, Palacios M y Ospina N. 2005. Algas como indicadores de contaminación. Universidad del Valle. Cali, Colombia. 164 p.
- Pérez-Morales, A., Olivos-Ortiz, A., Quijano-Scheggia, S. I., Espinosa-Rodríguez, C. A. y Jiménez-Santos, M. A. 2016. Estado actual del estudio de cianobacterias dulceacuícolas formadoras de florecimientos en el centro de México. p. 408-421.
- Pinilla G. 2000. Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano. Colombia (Bogotá). 66 p.
- Prescott G. 1984. The Fresh-Water Algae. Dubuque, IA. Michigan State University. 224 p.
- Quintanilla R. 2017. Procedimiento de estimación de la concentración celular de fitoplancton en muestras de agua dulce y marina por método Utermöhl. Laboratorio de Toxinas Marinas de la Universidad de El Salvador (Labtox-Ues). Sistema de gestión de Calidad. El Salvador. (SS). 15 p.
- Ramírez A y Viña G. 2000. Limnología colombiana, aportes a su conocimiento. Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano. Colombia. 293 p.
- Ramírez A. 1999. Ecología aplicada diseño y análisis estadístico. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. Colombia. 325 p.
- Ramírez J. 1982. El fitoplancton: Métodos de muestreo, concentración, recuento y conservación. Departamento de Biología, Universidad de Antioquia. Colombia. 7 p.
- Reguera B, Alonso R, Moreira A y Méndez S. 2011. Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. COI de UNESCO y OIEA, Paris y Viena. 59 p.
- Reguera, B. 2002. Establecimiento de un programa de seguimiento de microalgas tóxicas: 21-52. En: Sar, EA, ME Ferrairo y B. Reguera (Eds.). Floraciones algales nocivas en el Cono Sur Americano. Instituto Español de Oceanografía, Madrid, España. 311 pág.

- Restrepo J. D. y Escobar, H. A. 2016. Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980–2010): Anthropogenic and climate-induced causes. *Geomorphology*. 302: 76-91.
- Restrepo J. D., Kettner, A.J., Syvitskib, J.P.M. 2015. Recent deforestation causes rapid increase in river sediment load in the Colombian Andes. *Anthropocene*. 10: 13-28.
- Reyes C. 2009. Elaboración de abono orgánico a partir de plantas acuáticas: Elodea (*Hydrilla verticillata*) y Jacinto o Lirio de agua (*Eichhornia crassipes*), procedentes del Lago de Coatepeque y Lago de Güija. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE. San Salvador ES. 16 p.
- Reynolds C, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* 24: 417-428.
- Reynolds C. 1984. *The Ecology of Phytoplankton [La ecología del fitoplancton]*. Editorial universitaria de Cambridge, Nueva York, (USA). 540 p.
- Reynolds C. 1988. *Functional morphology and the adaptive strategies of freshwater phytoplankton: Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton*. New York: Cambridge University Pres. 388-433 p.
- Reynolds C. 1997. *Vegetation Process in the pelagic: a model for ecosystem theory [procesos de la vegetación pelágica: un modelo para la teoría del ecosistema.]*. Instituto de Ecología. Alemania. 371 p.
- Reynolds C. 2006. *The Ecology of Phytoplankton [Ecología del fitoplancton]*. 2a Edición. Editorial universitaria de Cambridge, Nueva York. 524 p.
- Rhyther J. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. [Fotosíntesis y producción de peces en el mar]. *Science*. (166): 72-76.
- Rivera C y Cuéllar T. 2010. *El Ecosistema de manglar de la Bahía de Jiquilisco sector occidental*. Universidad de El Salvador. Asociación Mangle. El Salvador. San Salvador. 243 p.

- Rodas-Pernillo, E., & Vasquez-Moscoso, C. A. (2020). Evaluación anual del fitoplancton y su respuesta a la calidad de agua en el lago de Amatitlán, Guatemala. *Ciencia, Tecnología Y Salud*, 7(2), 170–188.
- Rodríguez A, Páez F y Gárete I. 2014. El fitoplancton en la Camaronicultura y Larvicultura: importancia de un buen manejo. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Autónoma de México. 112 p.
- Rodríguez-Flórez, Clara N, Vinocur, Alicia, & Izaguirre, Irina. 2019. Dinámica del fitoplancton en tres lagos urbanos con diferentes estrategias de manejo: Análisis de floraciones estivales. *Ecología austral*, 29(1), 72-93. Recuperado en 06 de abril de 2023, de
- Roldán G y Ramírez J. 2008. Fundamentos de Limnología neotropical. Ciencia y tecnología. Colección de Ciencia. Universidad de Antioquia. (5): 440.
- Roldán G. 2003. Bioindicadores de calidad de agua en Colombia, Propuesta para el uso del método BMWP/Col. Físicoquímica de los ecosistemas acuáticos. Colección Ciencia y Tecnología. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 165 p.
- Rome, P.S.G. 1989. Estudio del fitoplancton de un lago somero y oligotrófico: Loch Rusky (Escocia). *Anales Jard. Bot. Madrid*. 46(1): 127 a 138 pp.
- Romero C, Arenas P y Mariazzi A. 1988, condiciones de luz sub-acuática como factor determinante de la eficiencia fotosintética. Embalse del Río Tercero (Córdoba, Argentina). Instituto de Limnología Dr. R. A. *Oecologia aquatica* (9): 1-8.
- Rott E. 1981. Results from phytoplankton counting intercalations [Resultados de intercalaciones de fitoplancton] Instituto de Botánica. Universidad de Innsbruck Austria 15 p.
- Round FE, Crawford RM, Mann DG 1990 *The diatoms: biology & morphology of the genera.*, Cambridge University Press.
- Roy S, Llewellyn C, Skarsd E y Johnsen G. 2011. Pigmentos de fitoplancton caracterización, Químico taxonomía y aplicaciones en oceanografía. Universidad de Noruega de ciencias y tecnología. 890 p.

- Russell D y Hunter R. 1970. Productividad acuática. Una introducción a algunos aspectos básicos de la oceanografía biológica y limnología. 306 p.
- Salazar-Alcaraz, I., Ochoa-Zamora, G. G., Hernández-Almeida, O. U., Palomino-Hermosillo, Y. A., Leyva-Valencia, I., Romero-Bañuelos, C. A., & Cepeda-Morales, J. (2021). Evaluación polifásica de las cianobacterias *Limnoraphis robusta* (Oscillatoriaceae) y *Microcystis aeruginosa* (Microcystaceae), formadoras de florecimientos en un lago cráter subtropical mexicano. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92
- Salmaso N, Flores N y Padisák J. 2015. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology [Clasificaciones funcionales y su aplicación en la ecología del fitoplancton]. *Freshwater Biology*. (60): 603-619.
- Salmaso N, Padisák J. 2007. Grupos morfo-funcionales y desarrollo de fitoplancton en dos lagos profundos (Lago de Garda, Italia y Lago Stechlin, Alemania). *Hidrobiología* (578): 97-112.
- Salmaso N. 2000. Factores que afectan a la estacionalidad y la distribución de las Cianobacterias y las Chlorophytas: estudio de casos de los grandes lagos al sur de los Alpes, con especial referencia al lago de Garda. *Hidrobiología* (438): 43-63.
- Samanez I, Ramirachín V, Arana J, Palma C, Ortega H; Correa V, Hidalgo M. 2014. Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: Plancton, Perfiton, Bentos (macroinvertebrados) y Necton (peces) en aguas continentales de Perú. Departamento de Limnología, Departamento de Ictiología– Lima: Ministerio de Ambiente. Perú. 75 p.
- Sánchez O, Herzig M, Peters E, Márquez R, Zambrano L. 2007. Perspectivas de ecosistemas acuáticos en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Cuicuilco. México. 283 p.
- Sánchez R, Castro-González M, Zea A. 2011. Efecto del enriquecimiento por nitrógeno y fósforo en los cambios netos de nutrientes y producción fitoplanctónica en la desembocadura del río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 35 (134): 35-43.

- Sar E, Ferrario M y Reguera B. 2002. Floraciones Algales Nocivas en el Cono Sur Americano Instituto Español de Oceanografía. 308 p.
- Sarkar, S., 2002. Defining “biodiversity”: assessing biodiversity. *The Monist*, 85: 131-155.
- Sawyer, C.N. and McCarty 1978. *Chemistry for Environmental Engineering* (3rd ed), McGrawHill Book Company, New York.
- Shannon C y Wiener W. 1949. *The mathematical theory of communication*. University Illinois Press, Urbana.132 p.
- Sherr E y Sherr B. 1991. Microorganismos planctónicos: células minúsculas en la base de las redes alimentarias del océano. *Tendencias en Ecología y Evolución*. (6): 50-54.
- Sierra, C. 2011. *Calidad del agua, evaluación y diagnóstico*. 1ª edición. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Medellín. p. 457.
- Simpson E. 1949. Measurement of Diversity. *Nature* (163): 688.
- Smayda, T.J. 1997. ¿Qué es una floración? un comentario *Limnología Oceanografía* 42. 1132-1136.
- Smith, V. H. & D. W. Schindler. 2009. Eutrophication Science: Where do We Go from Here? *Trends in Ecology and Evolution*, 24(4): 201–207.
- Soler B, Pérez I, Aguilar A, Villarreal I. 2012. Diatomeas del canal de Panamá: Bioindicadores y otros estudios pioneros, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología Departamento de Botánica y Centro de Ciencias del Mar y Limnología. Panamá 272 p.
- Tayupanta, J. R. 1993. La erosión hídrica: proceso, factores y formas. INIAP Archivo Histórico. Quito. p. 18.
- Toledo, A.P., Talarico, M., Chinez, S.J., Agudo, E. 1983. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processos de eutrofização em lagos e

reservatórios tropicais. XIX Congresso Interamericano de Engenharia e ambiental. Camboriú.

Varona-Cordero, F. y F. J. Gutiérrez-Mendieta (2006): Composición estacional del fitoplancton de dos lagunas del Pacífico tropical. *Hidrobiológica*, 16: 159-174.

Vázquez G, Castro G, González I, Pérez R, Castro T. 2006. Bioindicadores como herramienta para determinar la calidad del agua. *Depto. El Hombre y sus Ambiente*. (60): 41-48 p.

Vázquez G, Jiménez S, Favila ME, Martínez A. 2005. Seasonal dynamics of the phytoplankton community and cyanobacterial dominate in a eutrophic crater lake in Los Tuxtlas, México. *Ecoscience* 12 (4): 485-493.

Vicente E, Hoyos C, Sánchez P y Cambra J. 2005. Protocolo de muestreo y análisis para fitoplancton. Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva marco del agua, Confederación Hidrográfica de Ebro. Ministerio de Medio Ambiente. España. 43 p.

Vidal L y Pérez M. 2009. Claves Taxonómicas, en Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión. Bonilla, S. 41-44 p

Viessman W, Knapp L y Lewis G. 1977. Introducción a la Hidrología. Segunda edición editorial Harper y Row. E.U. 577 p.

Vila I, Barends I, Montecino V. 1987. Abundancia y distribución del fitoplancton en el Embalse Rapel, Chile Central. *Revista Chilena de Historia Natural*. (60): 37-55 p.

Villafañe V y Reid M. 1995. Métodos de microscopía para la cuantificación de fitoplancton. Manual de Métodos Ficológicos. Universidad de Concepción, Chile. 169-185 p.

Vinocur A. 2001. Taxonomía y ecología de algas de agua dulce de cuerpos lénticos de península Potter. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires. Argentina. 230 p.

- Viñebla, B, & López-Figueroa, F. (2009). Efecto de la radiación UV solar y artificial sobre la fotosíntesis y la actividad anhidrasa carbónica en macroalgas intermareales del sur de España. *Ciencias marinas*, 35(1), 59-74.
- Webb C, Ackerly D, McPeck A, Donoghue M. 2002. Phylogenies and community ecology [Filogenias y ecología de la comunidad]. *Revisión anual de ecología y sistemática*. (33): 475–505.
- Wehr J, Sheath R y Kociolek P. 2015. *Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification*. New York. 1025 p.
- Wehr J, Sheath R. 2003. *Freshwater algae of North America: ecology and classification*. San Diego, USA: Academic Press. 1050 p.
- Whiton A. 1975. *River Ecology [Ecología fluvial]*. Blackwell. Oxford. 725 p.
- Whitton BA y Potts M. 2000. *The ecology of cyanobacteria [Ecología de cianobacterias]*. Dordrecht, Kluwer Academic. 669 p.
- Wurtsbaugh, W. A., Vincent, W. F., Vincent, C. L., Carney, H. J., Richerson. 1991. V. 7 Nutrientes y su limitación del crecimiento del fitoplancton.
- Zalocar Y, Asselborn V y Casco S. 1998. Variaciones espaciales y temporales del fitoplancton en un lago subtropical de Argentina. *Brasil. Biol.* 58(3): 359-382

X. ANEXO

Anexo 1. a) Cilindros y bases para sedimentación de fitoplancton; b) detalles de la base de sedimentación y base para uso en un microscopio invertido. Fuente: Reguera et al 2011.

