

DINÁMICA FÍSICOQUÍMICA Y FITOPLANCTÓNICA DEL EMBALSE GUAJATACA,

PUERTO RICO

Por

FERNANDO PANTOJA AGREDA

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

En

Biología

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

2006

Aprobado por:

Carlos Santos Flores, Ph.D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Gustavo A. Martínez, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Mónica Alfaro, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Jorge R. Garcia, Ph.D.
Representante, Estudios Graduados

Fecha

Lucy B. Williams, Ph.D.
Directora, Departamento de Biología

Fecha

ABSTRACT

Artificial reservoirs, as well as the natural lakes, are threatened by the contamination, fertilization (nutrients) or the gradual eutrophication of their waters, with the subsequent loss of water quality. Therefore, during an evaluation of water availability, it is not only necessary to know water quantity, but also its physical, chemical and biological characteristics, and determine an optimal use. The purpose of the following investigation was to evaluate the physicochemical and phytoplanktonic characteristics of the Guajataca reservoir, with the purpose of knowing the spatial, temporal, and vertical dynamics of the water quality, the phytoplankton community present in the photic zone, the chlorophyll-a concentrations, and the trophic state of the reservoir. Monthly samplings were conducted during the day (09:00), from March 2004 until February 2005, in two sampling stations: the inlet and near the dam. Water transparency was determined by means of the Secchi disk. For each station, punctual profiles were made, at each meter, from the surface until the maximum depth, measuring: temperature ($^{\circ}\text{C}$), dissolved oxygen (O_2 mg/l), pH [H+] and conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}/25^{\circ}\text{C}$). Within the photic zone of the two stations, samples were collected in the water column with a horizontal-type Van Dorn bottle with capacity of 2 liters. A liter was used for chemical analyses (total nitrogen, total phosphorus, turbidity, suspended solids), while the other one was used to study the phytoplankton. Algal biomass was estimated by means of the chlorophyll-a acetone extraction method. Phytoplankton was fixed in 4% formalin, concentrated by centrifugation to 100 ml, and later counted with the aid of a 1 ml Sedgwick-Rafter sedimentation chamber. Low transparency values were registered, probably due to the high content of organic and inorganic matter in the water. A stable thermal stratification was observed during most of the year, what allowed us to classify the reservoir as warm monomictic. Dissolved oxygen dissolved in the surface was relatively high; however, anoxic conditions were present in the hypolimnion during the whole period of study. The reservoir presented a low salinity,

reflected in its low conductivity values. The water pH was slightly alkaline. Moderate nutrient concentrations were detected, especially of available phosphorus; therefore, when applying the Carlson index the reservoir was classified as mesotrophic. The relationship $N_T:P_T$, was higher than 9, indicating that phosphorus was the limiting nutrient in the reservoir. The values for suspended solids and turbidity were very low, so these parameters probably do not interfere with the productivity of the reservoir. Chlorophyll-a concentration reflected the annual variation in phytoplankton, its concentration being higher during summer, when solar radiation was also higher. The diversity and abundance of the phytoplankton was relatively low, as a total of 22 taxa, belonging to 20 genera and 6 classes, were registered. Euglenophyta was the dominant group along the year, contributing 43.9% of the total biomass. The dinoflagellates (Pyrrophyta) were the second most important group with 34.9% of the biomass, and Chlorophyta was the group with 10.71%. The phytoplanktonic community was structured (distributed), basically, in accordance to nutrient and light availability. Their behavior closely followed the climatic variations, particularly of the pluvial regime.

RESUMEN

Los embalses artificiales, al igual que los lagos naturales, están amenazados por la contaminación y la fertilización (nutrientes) o eutroficación paulatina de sus aguas, con la consiguiente pérdida de calidad. Por ello, en la evaluación de la disponibilidad del agua, no sólo es necesario saber qué cantidad está a nuestro alcance sino, además, deben conocerse sus características físicas, químicas y biológicas, y determinar así un uso óptimo. El propósito de la siguiente investigación fue evaluar las características fisicoquímicas y fitoplanctónicas del embalse Guajataca con el fin de conocer: la dinámica espacial, temporal y vertical de la calidad del agua, la comunidad de fitoplancton presente en la zona fótica, los valores de clorofila *a* y el estado trófico del embalse. Se realizaron muestreos mensuales diurnos (09:00), desde marzo de 2004 hasta febrero de 2005, en dos estaciones de muestreo: cola y presa del embalse. La transparencia del agua se determinó mediante el disco de Secchi. Para cada estación se hicieron perfiles puntuales, a cada metro desde la superficie hasta la máxima profundidad, y se midió: temperatura (°C), oxígeno disuelto (O₂ mg/l), pH [H⁺] y conductividad (µS/cm/25°C). En la zona fótica de las dos estaciones se tomaron muestras en la columna de agua con una botella horizontal tipo Van Dorn con capacidad de 2 litros. Un litro se destinó para el análisis químico (nitrógeno total, fósforo total, turbidez, sólidos suspendidos) y el otro se utilizó para estudiar el fitoplancton. La biomasa algal se estimó mediante la extracción de clorofila-*a* con acetona. El fitoplancton colectado se fijó con formalina al 4% y se concentró por centrifugación en 100 ml de muestra para su posterior conteo con una cámara de sedimentación de 1 ml de capacidad tipo Sedgwick - Rafter. Se registraron bajos valores de transparencia, debido a la alta cantidad de materia orgánica e inorgánica presente. Se registró una estratificación térmica estable durante la mayor parte de año, lo que permitió clasificar el embalse como cálido monomítico. El oxígeno disuelto en la superficie estuvo relativamente alto, sin embargo, se presentaron condiciones de anoxia en el hipolimnion del embalse durante todo el periodo de estudio. El embalse

presentó una salinidad baja, reflejada en sus bajos valores de conductividad. Las aguas presentaron un pH ligeramente alcalino. Se detectaron medianas concentraciones de nutrientes, especialmente de fósforo disponible, por lo que al aplicar el índice de Carlson, el embalse pudo ser clasificado como mesotrófico. La relación $N_T:P_T$, fue superior a 9, indicando que el nutriente potencialmente limitante en el embalse fue el fósforo. Los valores de sólidos suspendidos y turbidez fueron muy bajos, por lo tanto estos parámetros no interfieren en la productividad del embalse. La clorofila *a* reflejó la variación anual de la biomasa del fitoplancton siendo mayor su concentración en verano, cuando hubo mayor disponibilidad de nutrientes y radiación solar. La diversidad y abundancia del fitoplancton fue baja; se registraron un total de 22 taxones pertenecientes a 20 géneros y 6 clases. Euglenophyta fue el grupo dominante a lo largo del año, contribuyendo con un 43.9% al total de la biomasa. Los dinoflagelados (Pyrrophyta) fueron el segundo grupo en importancia, con un 34.9% de la biomasa algal, y el tercer grupo fue el de las Chlorophyta con un 10.71%. La comunidad fitoplanctónica se estructura, básicamente, en relación a la disponibilidad de nutrientes y luz, y su comportamiento sigue estrechamente las variaciones climáticas, particularmente del régimen pluvial.

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y sobrinos por la infinita confianza depositada en mí. A mi esposa Andrea por su amor y apoyo; y especialmente a mi hija, Luciana, por todos los instantes en que requirió mi presencia y no pude estar a su lado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a los miembros del comité graduado por sus sugerencias y revisión del manuscrito. En primer lugar quiero agradecer la confianza, el apoyo, voluntad y amistad del presidente de mi comité graduado, Dr. Carlos Santos Flores. Así mismo, quiero agradecer al Dr. Gustavo Martínez por todo el equipo y material provisto durante el trabajo realizado en el embalse Guajataca y por la ayuda en la aplicación de las pruebas estadísticas. Deseo agradecer también la motivación y los consejos de la doctora Mónica Alfaro. Mi gratitud al Dr. David Sotomayor por confiar en mi trabajo durante todo el tiempo que tomó mi maestría. De igual forma, agradezco a Farell Velásquez (DRN), administrador del embalse Guajataca, y todo su equipo de colaboradores. A mi amigo José Almodovar (UPRM) por su gran trabajo en microscopía electrónica y Nomarski. Al Dr Eberto Novelo (UNAM) por su valiosa ayuda en la identificación de Euglenophyta. Al doctor Víctor Martínez Almeida por la identificación de désmidos (desmidias). Al doctor Ernesto González (UCV), por la aplicación del programa SURFER y sugerencias en el diseño experimental. Al Dr. Luis Soler (USGS) por facilitarme el material batimétrico. Al doctor Juan González-Lagoa por obsequiarme un equipo valioso para muestreo de fitoplancton. Deseo agradecer la amistad y el apoyo de Diana Gualtero, Lourdes Colón y Donato Seguí, por su valiosa ayuda en las arduas jornadas de trabajo en campo y laboratorio. A todo el personal administrativo de los departamentos de Biología, y Agronomía y Suelos, de la Universidad De Puerto Rico - Recinto de Mayagüez, por facilitarme mi estadía durante la maestría.

Es difícil nombrar a todos y cada uno de mis amigos y compañeros que han hecho posible este trabajo, pero siempre tienen mi amistad y gratitud por toda su contribución. Finalmente por ser de suma importancia quiero agradecer a toda mi familia, por su apoyo incondicional a pesar de la distancia y a mi esposa Andrea por su amor y paciencia.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN LITERARIA	6
Embalses	6
Geología.....	7
Hidrología e hidráulica de los embalses.....	7
Eutrofización	9
Fisicoquímica de los embalses	10
Fitopláncton.....	11
Embalses tropicales y antecedentes limnológicos en Puerto Rico.....	15
OBJETIVOS	25
General	25
Específicos.....	25
MATERIALES Y MÉTODOS	26
Área de Estudio.....	26
<i>Geología y Suelos</i>	30
<i>Clima</i>	32
<i>Vegetación</i>	34
Diseño de Muestreo	35
Análisis de datos	41
RESULTADOS	43
Parámetros físico químicos	43
<i>Transparencia Secchi</i>	43
<i>Temperatura</i>	44
<i>Oxígeno disuelto</i>	47
<i>pH</i>	49
<i>Conductividad</i>	51
<i>Turbidez</i>	53
<i>Sólidos suspendidos</i>	55
<i>Nitrógeno Total</i>	57
<i>Fósforo total</i>	59
<i>Fósforo disponible</i>	61
<i>Clorofila a</i>	63
Nutriente limitante: relación NT/PT	67
Índice de estado trófico	71

Fitoplancton.....	74
<i>Chlorophyta</i>	76
<i>Euglenophyta</i>	78
<i>Pyrrophyta</i>	80
<i>Cyanobacteria</i>	82
<i>Bacillariophyta</i>	84
<i>Chrysophyta</i>	86
DISCUSIÓN	90
Heterogeneidad espacial del embalse Guajataca	90
<i>Cola o zona fluvial del embalse</i>	90
<i>Zona de transición</i>	91
<i>Zona de la cabeza o lacustre</i>	91
Parámetros fisicoquímicos	92
<i>Transparencia Secchi</i>	92
<i>Temperatura</i>	94
<i>Oxígeno disuelto</i>	97
<i>pH</i>	101
<i>Conductividad</i>	102
<i>Turbidez y Sólidos Suspendidos</i>	104
<i>Nitrógeno total</i>	105
<i>Fósforo total</i>	108
<i>Fósforo disponible</i>	111
<i>Clorofila a</i>	113
Nutriente limitante: relación NT/PT	115
Estado trófico	116
Fitoplancton.....	118
<i>Dinámica espacial del fitoplancton</i>	121
<i>Dinámica temporal del fitoplancton</i>	121
<i>Pyrrophytas</i>	123
<i>Euglenophyta</i>	125
<i>Chlorophyta</i>	127
<i>Cyanophyta</i>	128
<i>Chrysophyta</i>	130
<i>Bacillariophyta</i>	131
<i>Diversidad de fitopláncton</i>	132
CONCLUSIONES	134
RECOMENDACIONES	136
LITERATURA CITADA	137
ANEXOS	147

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Características morfométricas del embalse Guajataca, Puerto Rico.	30
Tabla 2. Variables físicas y químicas de la estación 1 (cola del embalse) y la estación 2 (presa), promedios para las tres profundidades	66
Tabla 3. Variables físicas y químicas de 0m, 1 m y 6 m de profundidad en la zona fótica, promedio para las dos estaciones.	66
Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson entre las variables fisicoquímicas para las dos estaciones de muestreo.	68
Tabla 5. Matriz de correlación de Pearson entre las variables fisicoquímicas para las tres profundidades.	69
Tabla 6. Número de taxones y su porcentaje promedio de contribución a la densidad total de la comunidad fitoplanctónica en el embalse Guajataca.	74
Tabla 7. Comunidad de fitoplancton de la estación 1 (cola del embalse) y la estación 2 (presa), promedios para las tres profundidades	88
Tabla 8. Comunidad fitoplanctónica a 0m, 1 m y 6 m de profundidad en la zona fótica basada en la media de las dos estaciones.	89

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localización del Embalse Guajataca al noroeste de Puerto Rico.	28
Figura 2. Batimetría tridimensional del embalse Guajataca (Cortesía Luís Soler, USGS).	29
Figura 3. Localización de las estaciones de muestreo. Estación 1: entrada, cola del embalse. Estación 2: salida, presa del embalse Guajataca.	37
Figura 4. Variación estacional de la transparencia estimada mediante el disco de Secchi, para las dos estaciones en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	44
Figura 5. Distribución de la temperatura en (°C), en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	45
Figura 6. Distribución de la temperatura en (°C), en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	47
Figura 7. Distribución del oxígeno disuelto en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	48
Figura 8. Distribución del oxígeno disuelto en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	49
Figura 9. Distribución del pH en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	50
Figura 10. Distribución del pH en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	51

	Página
Figura 11. Distribución de la conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	52
Figura 12. Distribución de la conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	53
Figura 13. Distribución de la turbidez en NTU, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	54
Figura 14. Distribución de la turbidez en NTU, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	55
Figura 15. Distribución de los sólidos suspendidos en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	56
Figura 16. Distribución de los sólidos suspendidos en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	57
Figura 17. Distribución de la concentración de nitrógeno total, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	58
Figura 18. Distribución de la concentración de nitrógeno total en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	59
Figura 19. Distribución de la concentración de fósforo total en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	60
Figura 20. Distribución de la concentración de fósforo total en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	61

	Página
Figura 21. Distribución de la concentración de fósforo disponible en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	62
Figura 22. Distribución de la concentración de fósforo disponible en mg/l, en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	63
Figura 23. Distribución de la Clorofila <i>a</i> , en función de la profundidad y del tiempo para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	64
Figura 24. Distribución de la clorofila <i>a</i> , en función de la profundidad y del tiempo para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	65
Figura 25. Valores medios de la relación N:P (mg/l) en el epilimnion de la estación 1, del embalse Guajataca.	66
Figura 26. Valores medios de la relación N:P (mg/l) en el epilimnion de la estación 2, del embalse Guajataca.	67
Figura 27. Relación entre nitrógeno total y clorofila <i>a</i> . Valores para las muestras de superficie y 1 metro de profundidad.	70
Figura 28. Relación entre fósforo total y clorofila <i>a</i> . Valores para las muestras de superficie y 1m de profundidad.	71
Figura 29. Puntuación del índice de Carlson para el embalse Guajataca (☉) con relación a la media de los valores de profundidad Secchi, clorofila <i>a</i> y fósforo total.	72
Figura 30. Distribución de probabilidad del nivel trófico del embalse Guajataca basado en clorofila <i>a</i> . La línea vertical punteada indica la concentración de clorofila en µg/l para el embalse Guajataca.	73

	Página
Figura 31. Distribución de la densidad total del fitoplancton (cel/ml) en función del tiempo y la profundidad para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	75
Figura 32. Distribución de la densidad total del fitoplancton (cel/ml) en función del tiempo y la profundidad para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	76
Figura 33. Distribución de la densidad de Chlorophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	77
Figura 34. Distribución de la densidad de Chlorophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	78
Figura 35. Distribución de la densidad de Euglenophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	79
Figura 36. Distribución de la densidad de Euglenophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	80
Figura 37. Distribución de la densidad de Pyrrophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	81
Figura 38. Distribución de la densidad de Pyrrophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	82
Figura 39. Distribución de la densidad de Cianobacteria en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	83
Figura 40. Distribución de la densidad de Cianobacteria en función del tiempo y de la profundidad para E2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	84

	Página
Figura 41. Distribución de la densidad de Bacillariophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	85
Figura 42. Distribución de la densidad de Bacillariophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	86
Figura 43. Distribución de la densidad de Chrysophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	87
Figura 44. Distribución de la densidad de Chrysophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.	88

INTRODUCCIÓN

Los embalses son una de las más radicales transformaciones que el hombre hace de la naturaleza: con ello se crean ecosistemas nuevos y se destruyen o modifican otros, con efectos positivos y negativos sobre el medio natural y humano. Aunque han sido criticados por sus efectos ambientales, los embalses son y serán una necesidad, dada la absoluta dependencia de la sociedad respecto al agua, más aún ante la desestabilización de la oferta debido al manejo inadecuado del recurso, a la destrucción de las fuentes de agua, al incremento de la demanda por crecimiento poblacional, industrial y agrícola. Para un manejo más adecuado de los embalses existentes y mejorar las características de los embalses futuros, minimizando sus efectos desfavorables, es y será necesario profundizar en el conocimiento de sus atributos ecológicos (Márquez y Guillot, 2001).

Tundisi y Straskraba, (1999) expresan que los embalses representan la fuente principal de agua en varias regiones, y también son un objeto de estudio limnológico importante. En los lugares dominados por ríos, como América Latina, la limnología de embalses es una fuente particularmente importante de información científica y tecnológica.

El explosivo crecimiento demográfico en América Latina y el Caribe durante los últimos años, con el consecuente aumento en la demanda de recursos de agua, ha acelerado la construcción de embalses artificiales para múltiples usos en abastecimientos de agua potable e industrial, para irrigación y para energía hidroeléctrica. Muchos de estos embalses, así como los lagos naturales, han sufrido las consecuencias del proceso de eutroficación, el cual ha interferido con los usos

designados de estos cuerpos de agua y, por lo tanto, con los propósitos específicos para los que esos embalses fueron creados (CEPIS/OPS, 2001).

La eutroficación es el término empleado para describir los efectos biológicos del incremento en la concentración de nutrientes (usualmente nitrógeno y fósforo) sobre el ecosistema acuático (Harper, 1992). Este proceso trae como consecuencia la sobreproducción de algas y macrófitas en cuerpos de agua que pueden producir problemas en ciertos usos como son: suministro de agua potable por alteración de sus propiedades organolépticas (olor, sabor), corrosión del equipo hidroeléctrico y distintos trastornos en los procesos de tratamiento potabilizador por disminución del contenido de oxígeno, acumulación del amoníaco en la columna de agua y resuspensión de ciertos metales (Fe, Mn) del sedimento bajo condiciones anóxicas. Aunque es un proceso que, de forma lenta, puede tener un origen natural, en la actualidad es fundamentalmente de carácter cultural acelerado por el aporte continuo de nutrientes de origen antropogénico.

Los cambios biológicos que ocurren en los cuerpos de agua debido a la eutroficación pueden ser resultado directo de la entrada de nutrientes, como la estimulación del crecimiento algal, o indirecto reflejado en el cambio de comunidades de niveles tróficos superiores (peces). Los efectos directos se presentan cuando los organismos, normalmente algas, crecen bajo condiciones limitadas por nutrientes. Con relación a lo anterior, el fitoplancton de un cuerpo de agua determinado es excelente indicador del estado trófico del mismo, dado que representa la integridad ecológica, al incluir las propiedades biológicas, químicas y físicas del ecosistema acuático (Reynolds, 1984).

Como consecuencia del aumento de la carga de nutrientes en los sistemas dulceacuícolas, la biomasa y la productividad fitoplanctónica también suelen aumentar (Wetzel, 2001). El establecimiento y la expansión de las poblaciones humanas están supeditadas al abastecimiento de agua dulce, lo que implica que un alto porcentaje de las aguas interiores del mundo está sometido al efecto de las actividades antrópicas (Infante, 1988). Con frecuencia, los productos de desecho que resultan de esas actividades (domésticas, agrícolas e industriales) se incorporan en último término en ríos y lagos cuyas aguas experimentan cambios físicos y químicos y, por consiguiente, afectan también las comunidades que en ellos viven. De esta manera, la incorporación excesiva de nutrientes a los sistemas acuáticos influye directamente sobre la dinámica del fitoplancton, por cuanto modifica su composición específica y eleva su producción (Infante, 1988). Así, durante el proceso de eutroficación, se produce una acumulación de nutrientes y de biomasa en los cuerpos de agua, acompañados por un aumento en los niveles de producción del sistema. Si los cuerpos de agua se emplean para el suministro de agua potable para la población, pueden surgir problemas relacionados con su suministro y tratamiento (Jorgensen y Vollenweider, 1988).

Las diferencias en el estado trófico se manifiestan claramente en la dinámica de los factores ambientales y en la estructura de la comunidad fitoplanctónica. En las zonas de aguas abiertas de lagos y embalses, el fitoplancton constituye la base esencial de las tramas tróficas (Lacroix, 1992), por lo que estos cuerpos de agua pueden considerarse como sistemas autótrofos, donde los componentes vegetales del plancton son capaces de acumular energía lumínica solar en forma de compuestos químicos energéticos gracias a la fotosíntesis (Infante, 1988). El fitoplancton está

sometido a una fuerte influencia estacional y en las zonas tropicales se pueden observar grandes contrastes entre las asociaciones de especies en las épocas de lluvias y de sequía (Horne y Goldman, 1994). Las algas responden al arreglo constante de la estructura física y química de su ambiente, presentando fluctuaciones en sus características poblacionales.

La sedimentación o la acumulación de sedimentos en el fondo de los embalses es un proceso natural producto del transporte de sedimentos por los ríos y por su asentamiento debido a la baja velocidad. Sin embargo, actividades humanas que remueven la superficie del terreno y su cubierta vegetal natural, incluyendo la construcción y la agricultura, aceleran los procesos naturales de generación y transporte de sedimentos. Esto resulta a su vez en aumento de las tasas de sedimentación en embalses y lagunas. En Puerto Rico, la sedimentación de los embalses es uno de los problemas más importantes en el manejo de los recursos de agua. La acumulación de sedimentos ha reducido la capacidad de almacenaje de agua en todos los embalses, alcanzando condiciones críticas en algunos de los más importantes. Una solución a este problema es el dragado. Sin embargo, los altos costos de esta acción y sus efectos ambientales limitan su implementación. Esto ha provocado que se revisen los diseños de las nuevas represas para evitar la acumulación excesiva de sedimentos.

Los embalses constituyen uno de los recursos de agua más importantes en Puerto Rico. En la isla existen 36 embalses principales propiedad del Estado Libre Asociado (ELA) y sus agencias, además de varios embalses menores privados. Los embalses públicos fueron construidos durante el siglo pasado para diversos usos,

incluyendo riego agrícola, generación hidroeléctrica, agua potable, control de inundaciones y recreación. Debido a su importancia para el bienestar de los residentes de la Isla, los embalses constituyen uno de los elementos principales en el Plan Integral de Conservación, Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua (Plan Integral de Aguas). Esta variedad de usos hace necesario un conocimiento del funcionamiento de estos ecosistemas, para así lograr un aprovechamiento racional de ellos. No obstante, el conocimiento limnológico de las aguas continentales es pobre en la isla, aunque recientemente se han incrementado los estudios mayormente en lo que respecta a los sistemas lóticos.

Dentro de esta perspectiva resulta claro que el diseño, construcción y operación de nuevos embalses planteará desafíos científicos y técnicos para garantizar, por ejemplo, niveles de calidad de agua mucho más altos que los requeridos para generación eléctrica. Una condición imprescindible para superar estos desafíos es contar con una base de conocimientos científicos de la ecología de estos cuerpos de agua, la cual apenas se posee, ya que, por lo que hasta ahora se sabe, no parece prudente transferir, y menos sin dicha base, experiencias en otras latitudes, donde otras condiciones ambientales determinan comportamientos ecológicos diferentes.

El propósito principal de esta investigación es profundizar en el conocimiento de la dinámica espacial, temporal y vertical de la calidad fisicoquímica y fitopláctónica del embalse Guajataca, lo que resultará potencialmente crucial para guiar su manejo, y será un ejemplo cuando, en el futuro, surja la necesidad de construir nuevos embalses, con criterio y diseño científico que garanticen el abastecimiento de agua de muy buena calidad para la población.

REVISIÓN LITERARIA

Embalses

Los embalses son considerados ecosistemas intermedios entre un río y un lago. El río embalsado regula y retarda su flujo y se extiende en forma de una capa de agua que con el tiempo alcanza su equilibrio, tanto en relación con el entorno físico como con referencia al desarrollo de la vida. La tasa de renovación es más lenta que en el río y más rápida que en el lago. La organización vertical del lago y la horizontal del río quedan sustituidas por otra organización intermedia y característica, en la que el elemento más importante es la asimetría dada por la presa y la cola del embalse (Margalef, 1983). La cola de los embalses se parece más al río y la cabeza (cerca de la presa) se asemeja a un lago, si bien en las inmediaciones de las estructuras de captación hay fuerte hidrodinámica interna, por efecto de la succión, por lo que en el cuerpo del lago se forma una amplia zona de transición.

Las fluctuaciones de nivel son mucho más intensas, frecuentes e irregulares en los embalses que en los lagos, inducidos por el tipo de operación hidráulica. Una diferencia primordial respecto a los lagos es que, mientras éstos suelen desaguar por la superficie la descarga en embalses es de aguas intermedias o profundas. Los embalses tienen fluctuaciones grandes de nivel en periodos cortos y tasas de renovación más elevadas que los lagos (Marquez y Guillot, 2001).

Los embalses y lagunas son sistemas acuáticos caracterizados por la baja velocidad y quietud de sus aguas. La sedimentación o la acumulación de sedimentos en el fondo de los embalses es un proceso natural producto del transporte de

sedimentos por los ríos y por su asentamiento debido a la baja velocidad. Sin embargo, actividades humanas que remueven la superficie del terreno y su cubierta vegetal natural, incluyendo la construcción y la agricultura, aceleran los procesos naturales de generación y transporte de sedimentos. Esto resulta a su vez en aumentos en las tasas de sedimentación en embalses y lagunas (Quiñones et. al 2004).

Geología

La naturaleza geológica de la cuenca es determinante para las características fisicoquímicas de las aguas y carga de sedimentos, las cuales van a influir a su vez sobre la productividad biológica, estado trófico del embalse y la abrasividad de las aguas. La naturaleza del vaso o cubeta del embalse, la vegetación y suelos inundados constituyen otro factor de gran importancia en la determinación del estado trófico y las características ecológicas (Marquez y Guillot, 2001).

Al igual que en los lagos naturales la forma y la orientación de la cubeta respecto al régimen dominante de vientos es determinante para la circulación de las aguas en los embalses y de sus características de estratificación y mezcla. Embalses alargados, sobre todo si lo son en la dirección de viento dominante, se mezclan con mayor frecuencia y de manera más uniforme que embalses de forma redondeada.

Hidrología e hidráulica de los embalses

Los embalses son el lugar de almacenamiento de un sistema hidrológico regional. Existe siempre una capacidad natural de la cuenca del río que transforma la

lluvia o el agua de deshielo en un régimen de corrientes, la cual es ultimada en unos 12000 km³ (Szesztay 1973).

El régimen de flujo, la estratificación térmica y química del agua son aspectos de suma importancia que deben tenerse en cuenta en la construcción de embalses. Las fluctuaciones estacionales de temperatura y el aporte de sedimentos y sólidos disueltos influyen en dicha estratificación. También influyen en ella el tiempo de residencia del agua en el embalse o retención hidráulica, lo cual acelera o retarda los procesos de descomposición de materia orgánica y el aporte de nutrientes. Un embalse con un periodo de retención hidráulica de 280 días como el de El Peñol (Colombia), tiene más probabilidad de una estratificación (que lo lleva a un estado de anoxia permanente en el fondo) que uno como el de Punchina (Colombia), que solo tiene un periodo de retención de seis días (Ramírez, 1989).

La localización de la salida principal del embalse tiene una influencia fundamental en la calidad del agua. Una salida alta en un embalse implica el mantenimiento de una capa de agua fría por debajo del nivel de dicha salida, ya que siempre se estará evacuando el agua superficial más caliente; habrá mayor retención de nutrientes y de materia orgánica en descomposición y tendencia a una anoxia permanente en el fondo, cuya capa será más grande mientras más profundo sea el embalse (Roldán, 1992).

En un embalse de salida intermedia el agua evacuada está localizada en un punto en el cual tanto la fotosíntesis como la respiración son bajas; el agua será un poco mas caliente que la del fondo, ya que se presenta más mezcla entre la superficie y el fondo y la capa anóxica se reducirá considerablemente (Wunderlich y Elder, 1973).

La salida baja cerca del fondo, crea condiciones más favorables para el embalse, ya que la retención de sedimentos y nutrientes es más baja, pues gran parte de ellos esta saliendo permanentemente, la capa anóxica se reduce y el embalse tiene la oportunidad de renovarse en forma continua. Este tipo de presa tendrá igualmente temperaturas altas, ya que las capas profundas frías están siendo continuamente evacuadas y son remplazadas por capas superficiales cálidas (Wunderlich y Elder, 1973).

Eutrofización

La eutrofización es el término empleado para describir los efectos biológicos del incremento en la concentración de nutrientes (usualmente nitrógeno y fósforo) sobre el ecosistema acuático (Harper, 1992). Los problemas asociados a ésta son, entre otros, el deterioro de la alteración de las propiedades organolépticas del agua (olor y sabor), corrosión del equipo hidroeléctrico, disminución de diversidad de especies, fuertes fluctuaciones de oxígeno disuelto, alta descomposición de materia orgánica, aparición de densas masas de algas y vegetación acuática que impiden el paso de la luz, crecimiento exagerado de biomasa algal y macrófita, y resuspensión de ciertos metales del sedimento bajo condiciones anóxicas. Aunque es un proceso que, de forma lenta, puede tener un origen natural, hoy en día es, fundamentalmente, de carácter cultural, acelerado por el aporte continuo de nutrientes de origen antropogénico (CEPIS/OPS, 2001).

Todos los embalses tienen una tendencia general a la eutrofización y a la contaminación, debido a su proximidad a las actividades humanas. Su vida es relativamente breve entre (60 y 70 años) por el gran aporte de sedimentos, el cual depende del estado de conservación de los suelos y del grado de erosión de la cuenca. En ellos, la producción primaria es muy similar a la de los lagos y depende básicamente del fitoplancton, siendo muy poco dependiente del retorno a la superficie de los elementos nutritivos acumulados en las capas profundas, pues existe una importante hidro-alimentación superficial con aporte de nutrientes (Margalef, 1983).

Fisicoquímica de los embalses

Las propiedades fisicoquímicas de los embalses dependen en gran parte de las características de los ríos y quebradas que los alimentan. El mayor volumen de agua almacenada en un embalse depende fundamentalmente de las corrientes, las cuales llevan disueltas materia orgánica y minerales producto de la erosión del terreno.

Los embalses, por lo general, están contruidos en zonas ya intervenidas por el hombre y cuyas cuencas hidrográficas en buena parte han sido deforestadas o son zonas dedicadas a actividades agrícolas y ganaderas. En cuencas como éstas, sumada a las altas precipitaciones tropicales, solo puede esperarse un alto arrastre de sedimentos y nutrientes que van a modificar las características fisicoquímicas de los embalses (Roldán, 1992).

Otro factor que juega un papel fundamental en la calidad del agua de los embalses es su forma, edad, profundidad y tiempo de retención hidráulica. Un embalse con una forma dendrítica, donde se presentan numerosas colas o entradas, está sujeto a que estas últimas, en especial, tengan un proceso de eutrofización más acelerado por la falta de circulación del agua en ellas (Roldán, 1992). Un embalse más antiguo tiende a la eutrofia por la acumulación paulatina de materia orgánica y mineral a través del tiempo, pero esto está muy relacionado con el tiempo de retención, el cual si es bajo, permitirá menor acumulación de materia orgánica y nutrientes que en un embalse de alta retención (Roldán, 1992).

La composición fisicoquímica de un embalse varía, por lo regular, drásticamente de la superficie al fondo en la columna de agua, lo cual puede llegar a provocar una verdadera estratificación química dependiendo fundamentalmente de la profundidad y tiempo de residencia hidráulica. El análisis de la columna de agua de un embalse puede mostrar, regularmente, alto contenido de oxígeno en la superficie y bajo o nulo en el fondo, pH en la superficie ligeramente básico y ácido en el fondo, fósforo bajo en la superficie y alto en el fondo, y el nitrógeno en forma de nitrato altos en la superficie pero los nitritos y el amoníaco altos en el fondo (Roldán, 1992).

Fitopláncton

Los productores primarios del plancton reciben el nombre de fitoplancton. En su gran mayoría son organismos microscópicos suspendidos en el agua a merced de las corrientes. Los grupos fitopláctonicos principales presentes en el agua dulce comprenden dos dominios: Eubacteria y Eukarya. En el primero de ellos figura la

División Cyanophyta; en el segundo se incluyen las siguientes divisiones: Chlorophyta, Chrysophyta, Euglenophyta, Pyrrophyta y Cryptophyta (Roldán, 1992).

Los miembros del fitoplancton no tienen alta capacidad de movimiento, pero algunas poseen cierto poder de locomoción, desplazándose mediante flagelos y otros mecanismos. En general, el fitoplancton se encuentra restringido a las aguas lénticas y a los grandes ríos en las partes donde la velocidad de la corriente es baja, aunque pueden hallarse también en los sitios donde la corriente es alta (Wetzel, 1981).

Las poblaciones fitoplánctónicas sufren fluctuaciones cualitativas y cuantitativas a lo largo del año, evidentes en diferentes escalas espacio temporales: asociadas a cambios en los factores ambientales, estacional, interanual, variación dentro y entre los lagos. En términos generales, puede decirse que en las zonas templadas, el número de individuos y biomasa del fitoplancton son bajos en invierno, cuando las temperaturas e intensidades de luz también son bajas; contrario a los trópicos, donde se tienen temperaturas y luminosidad relativamente constantes a lo largo de todo el año (García, 1977; Currie, 1990).

La abundancia del fitoplancton puede estar influenciada por la disponibilidad de nutrientes, herbivoría, interacciones con las bacterias, hundimiento, temperatura, niveles de luz, parasitismo, alelopatía y la física de la columna de agua. La variabilidad en la abundancia del fitoplancton en los lagos ha sido relacionada a las variaciones en la concentración de fósforo (PT), determinando que este nutriente, con frecuencia limita su crecimiento (Currie, 1990). No obstante, otros estudios revelan que in situ, el fitoplancton puede ser sensible a la relación de N:P (Suttle y Harrison, 1988).

El conocimiento de la dinámica fitopláctonica está fundamentado básicamente sobre estudios en los lagos templados (Margalef, 1983; Reynolds, 1986; Sommer, 1986). Los estudios ecológicos del fitoplancton en ambientes tropicales son más escasos y recientes (Reynolds, 1984; Talling, 1986; Huszar, 1989; Ramírez y Alcaráz, 2002) en comparación con los producidos para lagos templados del hemisferio norte.

En los lagos templados la variación del fitoplancton muestra una constancia en su periodicidad resultado de la regularidad en la fluctuación de las condiciones climáticas. Los factores ambientales señalados como de mayor influencia para esta región son la radiación solar y la temperatura al ser altamente variables durante el año (Wetzel, 2001). En los lagos y embalses tropicales, las oscilaciones en estos dos factores no son tan conspicuas como las observadas en las regiones templadas. Algunos autores plantean que, tal como los lagos templados, los tropicales también sufren cambios estacionales climáticos (especialmente los relacionados con la precipitación) que inducen modificaciones en las características físicas y químicas del agua (Hooker y Hernández, 1991; Payne 1986). Estévez (1988) plantea que la variación fitopláctonica no es tan regular en los lagos tropicales y se asocia en gran medida con las fluctuaciones en las condiciones ambientales locales; en particular está controlada por la disponibilidad de nutrientes y la profundidad de radiación subacuática. A su vez, de acuerdo con Talling (1986), la disponibilidad de nutrientes está regida por factores hidrológicos (entrada o salida de agua al sistema) o hidrográficos (estructura de la columna de agua y circulación).

Por otra parte, el fitoplancton tiende a concentrarse o reunirse en agregados según se considere un eje vertical o un plano horizontal. La disponibilidad de la luz, la

concentración de nutrientes y gases definen un gradiente vertical único (Infante, 1988). Este aspecto se evidencia perfectamente en los lagos de las zonas templadas, donde la estratificación obedece a la estacionalidad térmica anual y a los periodos de mezcla. En los trópicos la estratificación del fitoplancton obedece a migraciones diarias estimuladas por la luz; de esta manera, se distinguen dos estratos, a saber, uno ubicado en las aguas superficiales o zona fótica y el otro en las aguas profundas o zona afótica. Ciertos organismos del fitoplancton con capacidad de desplazamiento mediante flagelos contribuyen a la estratificación vertical de los sistemas, ya que pueden regular su posición mediante migraciones conspicuas en el día y dispersándose en la noche (Margalef, 1983; Reynolds, 1984).

Las variaciones en la distribución horizontal de las especies planctónicas están relacionadas con la interacción y la velocidad del viento, la estabilidad termal de la columna de agua, la entrada de afluentes en los lagos, el contenido de nutrientes y la turbulencia. Los cambios estacionales en la abundancia y la composición del fitoplancton puede presentarse a escalas temporales medidas en semanas, meses, o en el curso de un año, en donde las poblaciones se incrementan o disminuyen y las especies van siendo sustituidas unas por otras. En general el ciclo anual se caracteriza por presentar fluctuaciones en la abundancia total de especies influidas principalmente por la disponibilidad de nutrientes (Margalef, 1983; Reynolds, 1984).

En los lagos y embalses de las zonas templadas, con uno o más periodos de mezcla se conocen con exactitud los ciclos anuales de las variaciones en la abundancia y la riqueza de especies. Por lo contrario, los lagos tropicales, con condiciones ambientales relativamente constantes durante el año, se caracterizan más

bien por presentar una variedad estacional baja debido a los cambios en la insolación y al poco efecto del régimen de estratificación estacional (Richerson, et al, 1986).

Embalses tropicales y antecedentes limnológicos en Puerto Rico

Un hecho importante en la limnología de los lagos y embalses templados es que los nutrientes en la columna de agua generalmente proceden sin su retorno desde las capas más profundas ya que las aguas superiores normalmente no se mezclan con las inferiores hasta que ocurre la profundización estacional del epilimnion (Desestratificación). Sin embargo, en latitudes bajas la alta variabilidad en el grosor de la capa de mezcla tiene numerosas implicaciones tanto en el orden químico, físico como biológico. Regularmente está acompañada por el resuministro de nutrimentos, por un aumento de la biomasa y por movimientos de redistribución del fitoplancton hacia profundidades mayores. Por tanto, los incrementos de nutrientes pueden presentarse aún antes de la regeneración causada por la mezcla anual. Se plantea que dependiendo de la frecuencia de estos resuministros, y combinada con temperaturas medias altas y una mayor estabilidad de la radiación solar, el fitoplancton puede sobreponer la limitación causada por el consumo epilimnético durante el periodo estratificado logrando así alcanzar tasas importantes de regeneración (Lewis, 1983). En relación con esto, algunos estudios corroboran que las variaciones temporales en las comunidades fitoplánctónicas para las regiones del trópico no son despreciables (Talling, 1987).

Por ser los embalses en América Tropical ecosistemas de reciente formación, aun no existe suficiente información que permita conocer con exactitud cómo es el

comportamiento fisicoquímico y biológico de ellos. Brasil ha sido el país neotropical donde más estudios se han realizado en embalses tropicales, con un extenso seguimiento a los embalses situados en el sudeste del estado de Sao Paulo. Merecen destacarse los trabajos de Tundisi (1981, 1986, 1997), Takino et al (1985), Maier y Takino (1985), y Maier (1985). Deben mencionarse los trabajos realizados en el estado Florida por Beaver and Crisman (1991), en Venezuela por Lewis (1973, 1978, 1983) y González et al (1998, 2002, 2003, 2004), en Colombia los trabajos de Márquez y Guillot (1987) y Donato et al (1996).

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), centro especializado de la Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS), está llevando, desde 1981, un programa regional para el desarrollo de metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos y embalses cálidos tropicales de América Latina y el Caribe. Aparentemente, la mayoría de los lagos/embalses de la región están limitados por fósforo. Un sistema de clasificación de estado trófico de lagos cálidos tropicales y un modelo simplificado de fósforo total se han desarrollado con datos recopilados en la región, y han sido verificados contra datos de embalses africanos. Los modelos preliminares de clorofila "a" y de nitrógeno total aún requieren de mayor desarrollo (Salas y Martino, 2001).

Puerto Rico no es una excepción a la carencia de estudios sobre embalses; de sus más de 22 embalses solo unos pocos han sido estudiados desde el punto de vista limnológico; ninguno está estudiado a profundidad y solo en los últimos 20 años se han realizado estudios de algunos proyectos hidrológicos. Los trabajos que se han

efectuado no revelan propiamente la dinámica y estructura del fitoplancton y su relación con las variables fisicoquímicas en dichos cuerpos de agua. Los estudios adelantados permiten, no obstante, señalar diferencias sustanciales respecto a embalses de zonas templadas y frías, tanto en el comportamiento limnológico como a efectos ambientales.

Candelas (1964) planteó previo a la década de los cincuenta, que no se habían hecho muchos estudios de la calidad fisicoquímica y biológica de los cuerpos de agua dulce en Puerto Rico y se habían realizado muy pocos o ninguno de grupos taxonómicos de plancton, atribuyó la falta de estudios, en parte, a que los cuerpos de agua dulce estaban infectados con *Schistosoma mansoni* y el miedo a adquirir schistosomiasis detuvo a muchos investigadores de hacer estudios en ríos y lagos.

Este autor, en el primer estudio limnológico realizado en embalses de Puerto Rico, seleccionó lagos grandes (Guajataca, Dos Bocas, Caonillas, Matrullas, Guayabal, Patillas y Cidra) que simulaban mejor las condiciones de lagos naturales sin las fluctuaciones extremas de agua, y representaban las tres divisiones geológicas y geográficas de la isla. Los resultados de su estudio mostraron: (1) que el color del agua en los lagos de Puerto Rico estaba en un rango de 30 a 40 en un estándar de cobalto platino, (2) la transparencia relativa del agua tuvo grandes variaciones pero generalmente la visibilidad del disco de Secchi fue baja (un metro en promedio), (3) la temperatura máxima registrada fue de 31°C y la mínima de 22°C, y (4) no se notó una estratificación termal extensiva, ni se encontró termoclina.

Todos los lagos fueron considerados levemente alcalinos, con rango de pH de 7 a 8. Los rangos de oxígeno disuelto fueron de 0.2 – 11.25 ppm. En todos los lagos estudiados, el oxígeno estuvo presente desde la superficie al fondo, o hasta una

profundidad de 6 metros. El contenido de dióxido de carbono fluctuó de 2 a 9.5 ppm, y no se encontró dióxido de carbono libre en la superficie en ninguno de los lagos.

Valido (1975) realizó un estudio para establecer los hábitos alimenticios de *Tilapia mossambica* y *Dorosoma petenense* en el reservorio Guajataca. También incluyó una descripción general de la fisicoquímica y limnología del embalse y de los organismos planctónicos presentes, encontrándose que éste depende física y limnológicamente esencialmente de dos factores: el río Guajataca y las condiciones climáticas como son temperatura del aire, la lluvia y el viento. En referencia al plancton, *Perinidium* fue el taxón dominante en número y volumen en las muestras de fitoplancton y especies del género *Keratella* fueron las más comunes en el zooplancton.

Carvajal (1979) realizó una caracterización química, física y biológica de los lagos La Plata, Cidra, Dos Bocas, Carite, Lucchetti y Loco. Dentro de los parámetros evaluados, el fósforo total se presentó como ortofosfato en un 18%; sin embargo, las correlaciones entre el nitrógeno y el fósforo no fueron realizadas. La entrada de carga orgánica en las cuencas de drenaje de los lagos se estimó cerca del 8%. Los valores de coliformes totales, algunos metales y los compuestos de fósforo sobrepasaron los valores permitidos por la Junta de Calidad Ambiental (Environmental Quality Board, EQB).

Una de las consideraciones principales en la formulación de planes para el uso y manejo de lagos artificiales en Puerto Rico es su condición trófica, dada en términos de la productividad primaria del ecosistema. Tilly y García (1983), describieron la trayectoria anual de las diferentes formas de nitrógeno y fósforo en el lago La Plata y discutieron los factores más importantes que controlan la dinámica de nutrientes en

éste y otros 12 lagos de la isla. Se encontraron correlaciones positivas significativas entre las concentraciones de nitrógeno y fósforo y los niveles de productividad primaria en los 13 lagos de Puerto Rico. Este estudio concluyó que los niveles de carga de nutrientes y otros elementos al lago La Plata es, en términos generales, función del área de su cuenca de drenaje, la precipitación sobre la cuenca, su coeficiente de deslave y la concentración final nutrientes que resulta en el punto donde se establece que termina el río y comienza el lago.

Los valores de carga anuales para nitrógeno y fósforo fueron respectivamente de 167 gramos de N/m² y de 32.6 gramos de P/m². Valores de carga de aproximadamente 3700 y 1400 toneladas métricas para nitrógeno y fósforo respectivamente, representan el orden de magnitud de la aportación total de nutrientes. El río la Plata resultó ser el vehículo principal de carga total de nutrientes representando el 90% en cada caso. También encontraron correlaciones positivas entre los valores de precipitación mensual y cargas mensuales de nutrientes tanto para fósforo ($r = 0.64$) como para nitrógeno ($r = 0.75$).

Tilly y García (op. cit.), exponen que uno de los mayores problemas para el manejo de los lagos es guiarse con parámetros de zonas templadas, ya que las condiciones en el trópico son diferentes pues los eventos son antiestacionales, las tasas de fósforo y nitrógeno son limitadas, y la lluvia intensa y las condiciones topográficas producen una alta carga natural, debido a los vientos que originan una mezcla en la columna de agua. En este estudio también se examinaron datos limnológicos para 26 lagos de la isla. Los parámetros examinados para determinar el estado trófico fueron: clorofila, nitratos, fosfatos, transparencia y productividad neta.

Algunas comparaciones con lagos de Florida sugirieron que los lagos de Puerto Rico reciben más nutrientes sin florecimientos algales significativos. La capacidad asimilativa para cargas de nutrientes de los lagos locales es sustancialmente alta.

La investigación de Tilly y García también sugiere que deben medirse trayectorias anuales completas para temperatura, oxígeno y clorofila para más lagos en diferentes regiones de Puerto Rico, además de incluir concentraciones de fósforo y nitrógeno en el lago y en sus tributarios mayores. La clasificación de lagos en oligotróficos, mesotróficos y eutróficos es de poca aplicación en estos sistemas. La riqueza y pobreza de nutrientes, aunque ocurre, se da a diferente escala de productividad comparada con otras latitudes. La fertilidad natural y la erosión de los sustratos conllevan a un incremento natural de nutrientes. Por lo tanto, deben evaluarse el aporte de estas cargas en diferentes regiones de la isla para estandarizar patrones de productividad primaria en relación a nutrientes y consumidores.

El contenido del oxígeno disuelto en los lagos de Puerto Rico ha sido estudiado por Candelas (1964), Martínez (1979), Quiñones y Márquez (1980) y Nevares y Villamil (1981). Estos trabajos que, en conjunto, describen en cierta medida la mayor parte de los embalses de la Isla, muestran una deficiencia de oxígeno disuelto bajo los niveles superficiales. Se observa, en la mayor parte de los casos, una zona de rápida reducción de oxígeno entre los 4 a 6 metros en condiciones anaeróbicas bajo la quimioclina en los sistemas más profundos.

La dinámica y distribución del oxígeno disuelto en el lago La Plata, fue estudiada por García y Tilly (1983). El embalse se caracterizó por curvas clinogradas con quimioclinas variables entre 2 y 5 metros. Este tipo de distribución en el cual el

contenido de oxígeno disuelto se disipa en el hipolimnion del lago es típico de sistemas altamente productivos. La aireación del hipolimnion y la destratificación de la columna de agua siempre estuvo asociada a periodos o pulsos de alta precipitación y descarga. Las desviaciones del patrón clinogrado resultaron de corta duración y respondieron principalmente a periodos de altas descargas de aguas frías por tributarios.

García y Tilly encontraron además, que la estructura del oxígeno disuelto en el lago se explica sobre la base de la dinámica de procesos químicos, físicos y biológicos del sistema, de los cuales los más importantes aparentan ser: la morfometría del lago, el enriquecimiento de nutrientes y la respuesta biológica, la magnitud de la descarga de tributarios principales, la demanda química y biológica y el transfondo tropical. En síntesis concluyen que la estratificación marcada del oxígeno responde fundamentalmente a las condiciones eutróficas del lago. La alta disponibilidad de nutrientes mantienen densas poblaciones de algas y plantas acuáticas en los niveles superficiales del lago limitando la penetración de la luz y la consecuente producción fotosintética de oxígeno bajo estos niveles.

Soler et al. (1999) realizaron un estudio sobre la sedimentación del lago Guajataca concluyendo que la acumulación de sedimentos en el embalse es moderada desde su construcción en 1928. La capacidad de almacenaje ha sido reducida de 48.46 millones de metros cúbicos en 1928 a 42.28 millones de metros cúbicos en 1999. Esto representa una baja o disminución de almacenaje de 6.18 millones de metros cúbicos o aproximadamente el 13% de la capacidad original. El promedio a largo plazo de la tasa de sedimentación fue calculado en alrededor de 87000 metros cúbicos por año, equivalente a 0.2% de menor capacidad por año. Usando la relación capacidad/flujo

establecida por Brune (1953) la eficiencia de retención del reservorio fue estimada en 97 y 96 % para 1928 y 1999, respectivamente. Basado en la eficiencia de atrapaje del reservorio a largo plazo, la media anual de escurrimiento y la contribución del sedimento al área de drenaje del reservorio, se calculó el sedimento producido del lago Guajataca en cerca de 1188 mega gramos por kilómetro cuadrado por año. De acuerdo al promedio de la tasa de sedimentación a largo plazo, el periodo de vida útil del reservorio en términos de control de flujo y simulación es de aproximadamente de 486 años y se espera que esté completamente lleno de sedimento para el año 2485.

Martínez (2002) plantea el desarrollo de los criterios numéricos de los nutrientes para los lagos de Puerto Rico. Basándose en los datos de 14 estaciones en diferentes embalses, se seleccionaron los valores por debajo del percentil 25 de la distribución de frecuencia de estos lagos para cada uno de los siguientes parámetros: nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), profundidad Secchi (SD) y Clorofila *a*. Valores de 19.5 µg/l para fósforo total, 0.48 µg/l para nitrógeno total, 7.3 µg/l para clorofila *a*, representan un estimado del criterio numérico para lagos de Puerto Rico.

También se determinó que la profundidad Secchi no fue un buen indicador para el crecimiento de biomasa en la isla y aunque los datos no lo demuestran, este resultado es probable debido a la alta sedimentación prevaleciente en los lagos. Ésta investigación recomienda la necesidad de monitorear intensamente (incrementando la frecuencia de muestras y el número de estaciones) la química de los lagos de Puerto Rico. Son importantes los estudios que evalúen el impacto de la turbidez, el recurso contaminante y el tiempo de retención de agua, factores que controlan la relación entre el estatus de nutrientes y la biomasa algal en los lagos de la isla.

El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (2004) como parte del Plan Integral de Aguas, preparó un informe que provee datos actualizados sobre las características físicas y operacionales de 21 de los embalses principales en Puerto Rico. Esta información incluye datos sobre su historia, estructuras, capacidad de almacenaje inicial y actual, usos principales y condición relativa a la calidad de sus aguas. Los datos en este informe se basan en estudios individuales de los embalses principales en Puerto Rico llevados a cabo por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE), el Departamento de Recursos Naturales (DRNA), la Junta de Calidad Ambiental (JCA), el US Geological Survey (USGS), universidades públicas e independientes y consultores privados. También se presenta un análisis general sobre el estatus de los 21 embalses, así como recomendaciones para la restauración de aquellos en condiciones críticas desde el punto de vista de sedimentación o calidad del agua. Se proveen además, recomendaciones para planes de restauración y medidas necesarias para la protección de las cuencas que alimentan estos embalses.

Este informe incluye datos actualizados sobre veintiuno (21) de los embalses principales incluyendo el de Fajardo. Estos embalses, más los diez (10) embalses menores, representan una capacidad construida de aproximadamente 375,410 acres-pies (excluyendo a Fajardo). Esta capacidad ha sido reducida por la sedimentación a aproximadamente 287,983 acres-pies. La tasa de sedimentación anual entre los diferentes embalses varía desde 4.6 a 277 acres-pies por año. Las tasas más altas ocurren en las cuencas de los ríos en las regiones norte y este de la isla, donde la lluvia es más abundante, las pendientes de las cuencas son más empinadas, y el desarrollo y

deforestación son más intensos. Como parte de este informe se llevó a cabo un análisis preliminar de la condición de los embalses principales en Puerto Rico. El análisis refleja que existen problemas críticos de sedimentación en varios de los embalses más importantes desde el punto de vista de abastecimiento para sistemas de acueductos y riego. Este análisis establece que el embalse de Guajataca que supe hasta 20 mgd a los acueductos de Isabela, Ramey y Aguadilla, así como para usos agrícolas. Aproximadamente la mitad del agua descargada desde Guajataca se pierde en los canales de transmisión. Aunque se llevan a cabo mejoras a estos canales, es necesaria la protección de esta cuenca para minimizar la sedimentación del embalse.

OBJETIVOS

General

Evaluar las características fisicoquímicas y fitoplánctónicas del embalse Guajataca: con el fin de conocer la dinámica espacial, temporal y vertical de la calidad del agua, la comunidad de fitoplancton presente en la zona fótica, los valores de clorofila *a* y el estado trófico del embalse.

Específicos

Establecer la dinámica espacial, temporal y vertical de las variables físicas y químicas en dos estaciones del embalse Guajataca.

Establecer la dinámica espacial, temporal y vertical del fitoplancton en el embalse.

Identificar las posibles relaciones de los parámetros fisicoquímicos con la concentración de clorofila *a*, productividad primaria y estructura de la comunidad fitoplanctónica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

Todos los embalses mayores en Puerto Rico se han construido en la zona montañosa con el propósito de almacenar cantidades relativamente grandes de las escorrentías generadas por la abundante precipitación que ocurre en esta zona. En general, los embalses se han ubicado en cañones profundos con gargantas reducidas donde las represas requieran la menor inversión posible de fondos mientras almacenan la mayor cantidad de escorrentía en el menor espacio superficial. Esta característica de su diseño hace que los embalses sean profundos y sus orillas posean declives empinados. Otra característica de gran importancia es la estabilidad geológica de los lugares donde se ubican, para garantizar su seguridad sísmica (Quiñones et al., 2004)

El embalse Guajataca (llamado también Lago Guajataca) está localizado entre los Municipios de San Sebastián, Quebradillas e Isabela, al noroeste de Puerto Rico, a una altura sobre el nivel del mar de 200 metros (Figura 1). El embalse Guajataca fue construido en el año 1928 por la Autoridad de Energía Eléctrica. Originalmente se utilizó para riego de la porción noroeste de la isla. Luego se construyeron las plantas de Isabela 1, 2, y 3 para producción de energía las cuales están cerradas actualmente. Las aguas del sistema se utilizan para riego y consumo público en los municipios de Aguadilla, Isabela, Moca, Aguada y Quebradillas. En 1995 aproximadamente el 52% del agua fue usada para abastecimiento público y el 48% para irrigación de cultivos.

El agua del embalse cubre una superficie de 3.42 km². Tiene un área de captación de 9.46 km² cuadrados y un área de drenaje de 63.7 km². Originalmente el reservorio tuvo una capacidad de almacenaje de agua de 48.5 millones de m³, pero para 1999 la capacidad se redujo por acumulación de sedimentos a 42.3 millones de m³ (Soler et al, 2000). La profundidad media es de 12.3 m, siendo la máxima de 27 m en las inmediaciones de la presa (Figura 2). El dique de la presa tiene 37 metros de altura y 372 metros de largo. Se supe de las aguas del Río Guajataca y sus tributarios. En la tabla 1 se presentan las características morfométricas del embalse.

Tabla 1. Características morfométricas del embalse Guajataca, Puerto Rico.

Área de Superficie	3.42 km ²
Volumen	42.8 x 10 ⁶ m ³
Profundidad media	12 m
Profundidad máxima	27 m
Ancho máximo	1580 m
Longitud máxima	2600 m
Desarrollo línea de costa	11.9
Perímetro	33.25 km
Tiempo de residencia promedio	146 días

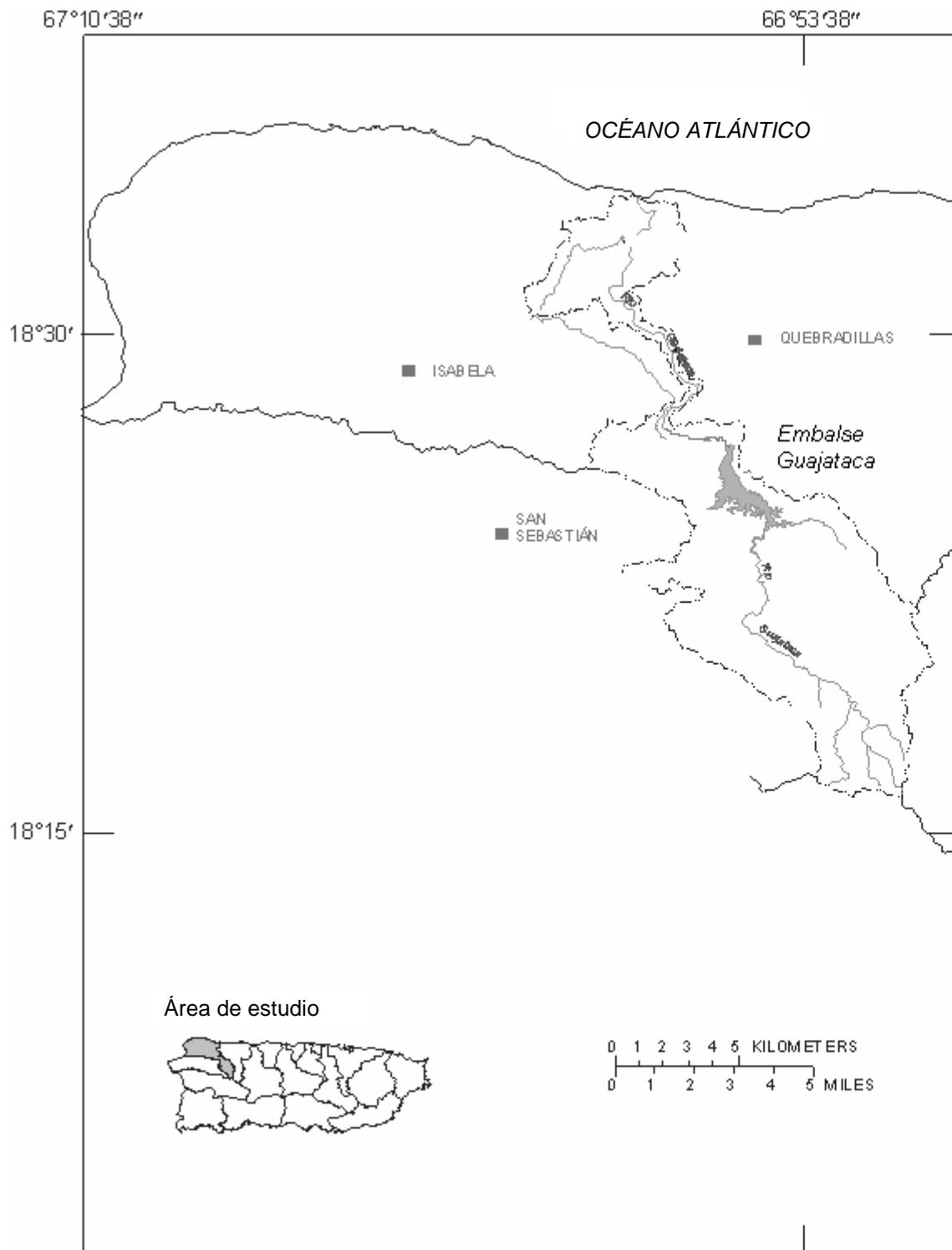


Figura 1. Localización del Embalse Guajataca al noroeste de Puerto Rico.

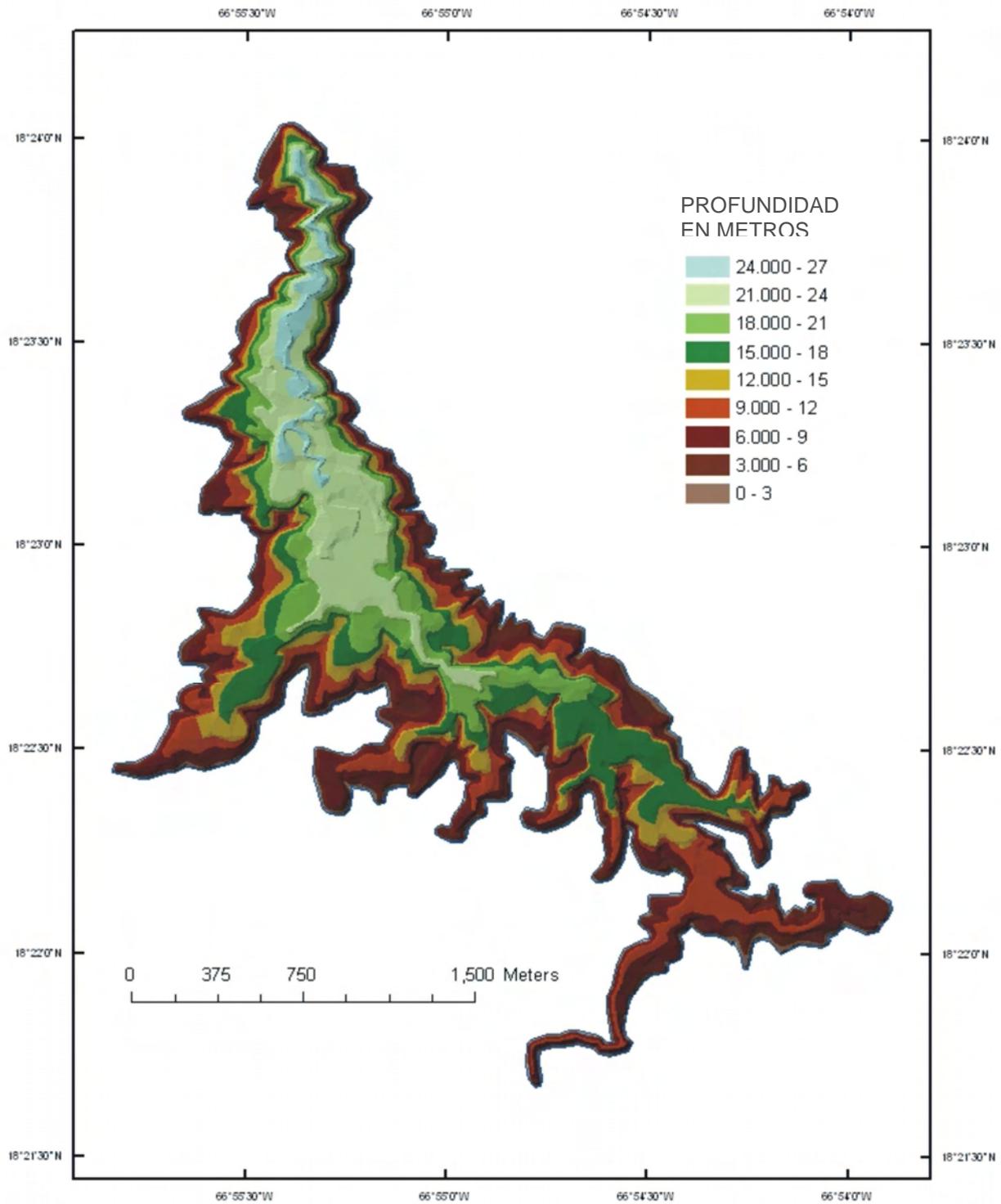


Figura 2. Batimetría tridimensional del embalse Guajatoca (Cortesía Luís Soler, USGS)

Geología y Suelos

Las tres principales divisiones fisiográficas en el área del embalse son tierras de montañas, los llanos costaneros y los llanos inundables a lo largo de los ríos. Estas formas de terrenos consisten de rocas y sedimentos que se originaron mayormente en los tiempos terciarios y cuaternarios (Gierbolini, 1975).

Las rocas de esta zona de montaña son mayormente de origen volcánico e ígneo intrusivo pero consistente además de esquistos, de serpentina, al igual que tufas volcánicas, flujos de lava y breccias de tufa. Las montañas se caracterizan por laderas inclinadas cubiertas de suelo, cumbres en forma de V invertida, y hondonadas en forma de V, que han sido profundamente bisectadas por las corrientes de agua.

Los llanos costaneros están paralelos al litoral de la costa norte. En esta área, se han depositado sedimentos aluviales y de terrazas en una superficie casi llana. El relieve es escabroso y ha sido causado por la solución subterránea de roca caliza. Esta solución ha producido sumideros, cuevas, y muchos acantilados escarpados. Esta área escabrosa dominada por topografía cárstica, consiste de montes con laderas empinadas conocidas como mogotes y entre éstos hay muchos valles pequeños. Los desagües se vierten mayormente en sumideros naturales.

El área del embalse Guajataca ésta dominada por suelos de tipo molisol sobre roca caliza (Rendolls) y son representados en esta zona por un conjunto de suelos denominados asociación Colinas-Soller. Esta asociación se encuentra en terrenos ondulantes a riscosos y en colinas con cimas redondeadas. Muchos fragmentos rocosos están sobre la superficie de algunos de estos suelos. Son suelos someros y

moderadamente profundos, porosos, lómicos y arcillosos, con numerosos peñascos aflorantes. Los principales suelos de ésta asociación yacen sobre roca caliza, y son bien desaguados (Gierbolini, 1975).

La serie Colinas son suelos que ocupan las pendientes más ríscas de la asociación, en las laderas y cumbres de los montes calizos. Son pardo oscuros, calcáreos y de textura moderadamente fina, moderadamente permeables y de buen desague. Estos suelos son medianamente profundos a la roca caliza blanda. Se han formado en materiales residuales meteorizados de la roca caliza blanda. El declive varía de 12 hasta 16 por ciento, el escurrimiento es rápido y la erosión progresiva. En un perfil representativo la capa superficial es pardo oscura, calcárea, de textura arcilloso lómica, de alrededor de 15 cm de espesor. Esta capa contiene algunos fragmentos finos de roca caliza. El subsuelo hasta una profundidad de 40 cm, es pardo grisáceo oscuro, calcáreo, friable, ligeramente pegajoso y plástico, de textura arcilloso lómica que contiene algunos fragmentos finos y medianos de roca caliza. El substrato, hasta una profundidad de más de 1.5 metros, es una mezcla de roca caliza amarilla y blanca que tiene fragmentos comunes, finos y medianos de roca caliza (Gierbolini, 1975).

La serie Soller son suelos de buen drenaje y moderadamente permeables. Estos suelos se han formado en material residual meteorizado de roca caliza dura. El declive varía de 2 hasta 40 por ciento. Son poco profundos, de color gris bien oscuro, moderadamente alcalinos a neutrales, moderadamente permeables, de textura fina y yacen sobre la roca caliza dura. En un perfil representativo la capa superficial es gris muy oscura, moderadamente alcalina, arcillosa, y de alrededor de 12.7 cm de espesor.

El subsuelo es pardo grisáceo muy oscuro, moderadamente alcalino, firme, ligeramente pegajoso y plástico, arcilloso y de alrededor de 17 cm de espesor. El substrato consiste de roca caliza parcialmente meteorizada. La profundidad de la roca caliza dura y fragmentada es de alrededor de 66 cm. Esta asociación se usa para gran número de cosechas y algunas áreas están ocupadas por bosques breñosos, especialmente en las laderas más ricas. Las mayores extensiones están dedicadas a pastos espontáneos y se han establecido algunas fincas de ganado lechero. Un área reducida está sembrada de yerba Pangola (Gierbolini, 1975).

Clima

El clima se clasifica como subtropical, de acuerdo con el mapa de las zonas de vida del sistema de clasificación de Holdrige, comúnmente usado en Puerto Rico (Ewell y Whitmore, 1973). El invierno es la estación más fría y seca. Durante el invierno, hay al menos dos meses de poca lluvia, cuando la región está bajo la influencia de un sistema de alta presión subtropical. Por lo general, las lluvias en invierno y primavera están asociadas a los sistemas frontales cargados de humedad que se acercan a la zona por el noroeste. Los veranos son calientes y húmedos. Durante el verano la región no está bajo la influencia de la alta presión atmosférica y hay una corriente estable de aire húmedo proveniente del Océano Atlántico hacia el oeste (vientos alisios), que es la fuente principal de las lluvias en verano y otoño.

La lluvia varía tanto geográficamente como por época. La lluvia promedia cerca de 2000 mm año. La variación en la cantidad de lluvia es principalmente el resultado de la topografía y de los patrones predominantes del tiempo. No hay periodos

absolutos de sequía o de lluvia en esta área. La lluvia, por lo general, es más abundante en mayo y en el periodo de agosto hasta octubre, y más escasa en el periodo entre enero hasta marzo. La radiación solar es abundante aun durante las llamadas épocas de lluvia.

Gran parte de la lluvia es de origen orográfico, y se produce por el levantamiento de vientos alisios húmedos sobre las cordilleras interiores. La lluvia cae como aguaceros cortos que son frecuentemente de moderados a pesados, especialmente en los meses de mayo y noviembre. La lluvia también es producida por ondas del este y por vaguadas del oeste. La cantidad de lluvia que cae por efecto de estos fenómenos depende de la intensidad y de la velocidad con que pasan a través de la región del embalse. Las ondas o vaguadas pueden traer solamente nubosidad, o pueden traer uno o más días de nubosidad y lluvia.

En el área del embalse, como en casi todo Puerto Rico, hay solamente una pequeña variación cada año de la temperatura promedio. Esta variación es generalmente más pequeña en las áreas cerca de la costa. En enero la temperatura diaria promedio máxima es de 26.6 ° C y en julio de 29.4° C.

El régimen de vientos es típico del que se encontraría en la costa oeste de una isla en la cual el clima está generalmente influenciado por los vientos alisios prevalecientes del este, pero que también está afectado por las brisas que vienen de las montañas y el mar. Hay mucha variación en la dirección y en la velocidad del viento causada por la topografía local, especialmente en el interior montañoso. Por lo general, los vientos más fuertes ocurren temprano en la tarde y los más leves durante

la noche. La velocidad del viento también varía periódicamente. Por lo general, el viento más fuerte en julio, y el más leve en otoño.

Vegetación

La vegetación en la zona del embalse obedece a la clasificación de las áreas por su zona de vida según (Holdridge (1947) y que fuera aplicada a Puerto Rico por Ewel y Whitmore (1973). Los bosques públicos fueron agrupados por tres zonas en el documento conocido como “The Master Plan for the Commonwealth Forests of Puerto Rico” preparado por el Departamento de Recursos Naturales en 1976. Esta clasificación incluye bosques de costas, de la región montañosa y de la región de la caliza del norte. De acuerdo a esta clasificación, el embalse de Guajacata se encuentra en la región de la caliza del norte y pertenece a la zona de vida de bosque húmedo subtropical. Ésta es la zona de vida con más área en toda la isla. La precipitación promedio de la zona está entre 1000 ó 1100 mm hasta 2000 ó 2200 mm. La diferencia de suelos que predomina en la isla establece una variación en la capacidad de retención de agua en diferentes áreas de Puerto Rico que están bajo esta clasificación. La mayoría de las áreas bajo esta zona de vida sufrió deforestación o éstas fueron degradadas ya que los suelos tienen una buena capacidad agrícola. Con la excepción de los suelos ricos en serpentina o derivados de caliza, la mayoría de los restantes suelos en esta zona de vida cuenta con una cubierta no forestal o un bosque secundario si están en terrenos privados. Debido a que el área del embalse pertenece a los bosques públicos de la zona de la caliza del norte, esto lo hace remanente importante de la vegetación típica, así como un importante centro de biodiversidad

para la isla. La zona de mogotes que se encuentra en la caliza del norte tiene un gradiente de humedad del tope a su base debido a la percolación del material del suelo, su geología y su orientación con relación al paso del sol que contribuye a una alta diversidad vegetativa en esta zona. Estos bosques también cuentan con importantes recursos de biodiversidad debido a su composición de suelos donde se encuentra la serpentina. Los suelos de estos bosques sirven de albergue a muchas especies endémicas.

En la región de la caliza del norte existe mucha presión por el uso de la corteza terrestre lo cual puede afectar el sistema de bosque que aun existe en estas áreas. Los bosques pasan a ser un parcho rodeado de un ambiente diferente con la eliminación de los mogotes o con disturbios como carreteras que fragmentan este ecosistema afectando el balance hídrico y su función con los acuíferos de la región norte de la isla. Esta zona de vida es la más impactada por usos y su composición vegetal fuera de las áreas protegidas está dominada por bosques secundarios.

Diseño de Muestreo

Se establecieron estaciones de muestreo con la finalidad de evaluar dos zonas representativas del lago:

Estación 1 (E1). 18° 23' 48" N y 66° 55' 22" W: ubicada en la cola del embalse donde desemboca el río Guajataca con una profundidad máxima de 10 metros (Figura 3). Los criterios de selección fueron: sitio donde el río descarga sus aguas, zona litoral con baja profundidad, alta sedimentación y entrada de nutrientes y sólidos totales.

Estación 2 (E2). 18° 21' 58" N y 66° 21' 58" W: ubicada en la presa del embalse, cerca de la salida de agua en la torre de captación. Su profundidad máxima fue de 26 metros (Figura 3). Los criterios de selección fueron: sitio donde se toma el agua para riego y consumo, zona limnética con la mayor profundidad, aguas más claras, bajo contenido de sólidos y baja sedimentación.

En cada estación se realizaron registros y toma de muestras mensualmente de marzo 2004 a febrero de 2005, entre las 11.00 y 13.00 horas. Los parámetros temperatura ambiental (°C), precipitación (mm), caudal del río (m³/s), nivel del embalse (m) fueron suministrados por el US Geological Survey (USGS). La velocidad del viento (m/s) se midió a intervalos de media hora mediante un anemómetro portátil Davies. El tiempo de residencia promedio del embalse fue estimado a partir de los datos hidrológicos aportados por el USGS.

Para cada estación se hicieron perfiles puntuales, a cada metro desde la superficie hasta la máxima profundidad y se midió: temperatura (°C), oxígeno disuelto (mg O₂/l), pH [H⁺] y conductividad (μS/cm/25°C) mediante un multímetro electrónico modelo YSI 85 con una sonda de 30 metros de largo.

Para las dos estaciones se determinó la transparencia del agua utilizando un disco de Secchi de 20 cm de diámetro. La profundidad que alcanzó la zona fótica (aquella donde recibe el 1% de la luz incidente) se determinó mediante la corrección del valor de la transparencia Secchi, multiplicado por el coeficiente de 2.7 según Talling (1971). El coeficiente de extinción de luz fue igual al cociente entre una constante (1.7) y la profundidad en metros a que el disco deja de verse (Atkins y Poole, 1929).



Figura 3. Localización de las estaciones de muestreo. Estación 1: entrada, cola del embalse. Estación 2: salida, presa del embalse Guajataca.

Paralelamente, en cada uno de los puntos y profundidades seleccionadas de la zona fótica (0m, 1m y 5 m) en E1 y (0m, 1m y 6m) en E2 se tomaron muestras en la columna de agua con una botella horizontal tipo Van Dorn con capacidad de 2 litros para los análisis químicos y biológicos.

Las muestras para los análisis de nutrientes fueron filtradas a través de filtros de celulosa con diámetro de poro de $0.45\ \mu\text{m}$ y almacenadas en botellas de vidrio, en frío y en oscuridad para posteriormente ser analizadas en el laboratorio de suelos de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, teniendo en cuenta los métodos recomendados por la APHA (1989). Se analizaron las muestras de agua tomadas de la superficie, 1m y 5 m de profundidad y se registró los parámetros de nitrógeno total (mg/l) y fósforo total (mg/l). La turbidez (NTU) se midió por el método nefelométrico

con un turbidímetro LaMotte 2020 y los sólidos suspendidos (mg/l) por ganancia o pérdida de peso mediante gravimetría según recomendaciones de la APHA (1999).

Para el análisis de clorofila *a* se filtraron 250 ml de agua tomados de la botella Van Dorn con filtros Whatman GF/F de 0.7 μm de retención de partícula y 47 mm de diámetro. La extracción de clorofila se realizó por macerado de los filtros en solución de acetona al 90% seguido de refrigeración por 24 horas. La fluorescencia del extracto de clorofila fue medida en un fluorómetro Turner Desing 10-AU utilizando el método USEPA (2003). La amplitud temporal del cambio de biomasa, expresada entre el cociente de las concentraciones máximas y mínimas de clorofila *a* alcanzadas fue estimado mediante la relación ($= \log [\text{clorofila } a \text{ máxima}]/[\text{clorofila } a \text{ mínima}]$).

Para el análisis cualitativo de fitoplancton se tomaron muestras mediante arrastre vertical desde el límite inferior de la zona fótica hasta la superficie usando una red de plancton de 45 μm . Las mismas se fijaron con formol al 4%. Para el análisis cuantitativo se tomaron muestras de agua por medio de la botella Van Dorn de 2 litros; colectadas en cada una de las profundidades establecidas de cada estación. Las muestras se preservaron con formol al 4%. En el laboratorio de limnología de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, el fitoplancton se concentró en 100 ml de muestra por centrifugación para su posterior conteo con una cámara de sedimentación de 1 ml de capacidad tipo Sedgwick – Rafter. Las especies se cuantificaron por organismos, considerándose como tal una colonia, un filamento o una célula, según el nivel de organización específico. La identificación taxonómica de las algas se realizó siguiendo los criterios de Prescott (1973), Bicudo (1970), Komarek (1986), Parra y Bicudo (1995). A partir del tipo de organismos fitopláctonicos

presentes en un ambiente particular, así como de su abundancia y densidad, se pueden estimar una serie de índices que permiten determinar el estado trófico y la calidad del agua (Ramírez, 2000). Para el presente estudio se identificaron los tipos de algas encontrados en las muestras de fitoplancton y se estimó su abundancia, riqueza de especies y frecuencia relativa.

El Índice de Estado Trófico de Carlson (IET) se aplicó para determinar las características asociadas al estado trófico, como son la transparencia o profundidad Secchi, la concentración de clorofila y el contenido total de fósforo.

$$\text{IET (PS)} = 10 \left[6 - \ln \text{PS} / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (cla a)} = 10 \left[6 - (2.04 - 0.68 \ln (\text{cla a})) / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (PT)} = 10 \left[6 - (\ln (48/\text{PT}) / \ln 2) \right]$$

Donde:

IET = índice de Estado Trófico de Carlson

PS = profundidad Secchi en metros

Cla a = clorofila en mg.m^{-3}

PT = fósforo total en $\mu\text{g.l}^{-1}$

donde IET (DS), IET (Clo a) y el IET (PT) son estimados independientes de un mismo índice. $\text{TSI} = (\text{TSI (DS)} + \text{TSI (Clo a)} + \text{TSI (P total)})/3$

El criterio de aplicación es:

Categoría del estado trófico	Índice del estado trófico
Oligotrófico	< 30
Hipotrófico	30 - 40
Mesotrófico	40 - 50
Eutrófico	50 - 70
Hipereutrófico	> 70

Para evaluar la tendencia trófica del embalse se aplicó el modelo matemático de Vollenweider (Vollenweider y Kerekes, 1981). Los resultados de la concentración de clorofila *a* se extrapolaron en una gráfica de distribución probabilística de estado trófico (Salas y Martino, 2001). La relación nitrógeno total (N λ) / fósforo total (P λ) propuesta por Vollenweider (1983) para el fitoplancton y utilizada por el Proyecto fue de 9:1. De esta forma, los lagos/embalses con relaciones de nitrógeno a fósforo superiores a un valor de 9 son considerados potencialmente limitados por fósforo, mientras que aquéllos cuya razón era inferior a 9 son limitados por nitrógeno.

Índice de Diversidad de Shannon – Weaver

$$H' = - \sum p_i \ln p_i$$

Donde:

$$p_i = n_i / n$$

n_i = número de individuos del taxón *i*ésimo

n = número total de individuos en la muestra

$$n = \sum n_i$$

Según Margalef (1983), en los ecosistemas lacustres continentales el fitoplancton puede llegar a presentar una diversidad muy por debajo de uno (1) en los ambientes muy eutróficos, y un máximo de cinco (5) en los oligotróficos y distróficos.

Índice de Riqueza de Margalef.

$$R = s - 1 / \ln n$$

Donde:

s = número de taxa registrados

n = número total de individuos en la muestra

Es una medida del número de especies o taxa por unidad de muestreo. La reducción en el número de especies en un ecosistema es una medida útil del estrés causado por algún factor alóctono (Muhlhauser, 1987).

Análisis de datos

Se realizó un análisis descriptivo y exploratorio de cada variable. El grado de dependencia entre variables se determinó a través de un modelo de regresión y correlación lineal simple. Algunas variables fueron normalizadas usando transformación logarítmica.

Las variables abióticas y bióticas fueron correlacionadas utilizando el coeficiente de correlación de Pearson. Para comparar estadísticamente las dos estaciones de muestreo se utilizó como replicas dos muestras tomadas en el primer metro de la

columna de agua y se aplicó las pruebas de análisis de varianza y *t* de Student (Sokal y Rohlf, 1979) mediante los paquetes estadísticos SAS System versión 8.0 e Infostat versión 2.0. Se aplicó una prueba de regresión múltiple con el fin de determinar la relación funcional entre las variables fisicoquímicas y las biológicas.

Los valores de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, nutrientes, clorofila *a* y grupos de algas, fueron graficados mediante isolíneas en función de la profundidad y el tiempo, con el programa Surfer 8.0, utilizando el método de interpolación Kriging. Este método geoestadístico es un interpolador muy flexible y exacto que produce mapas de datos visuales ubicados en el espacio a través del cual se expresan sus tendencias.

RESULTADOS

Parámetros físico químicos

Transparencia Secchi

En la estación 1 (E1), los valores obtenidos por el disco de Secchi variaron entre 1.3 m (febrero) y 2.3 m (julio), con un promedio de $1.71 \text{ m} \pm 0.31$. En la estación 2 (E2), los valores de transparencia del agua variaron entre 1.6 m (enero) y 3.2 m (julio), con un promedio de $2.21 \text{ m} \pm 0.62$ (Figura 4). La prueba de t-student demostró que hubo diferencias estadísticamente significativas entre los valores de transparencia de ambas estaciones ($t=2.48$ y $p<0.05$).

De acuerdo con la constante de 2.7 veces la transparencia de Secchi (Poole y Atkins, 1929), la amplitud de la zona eufótica (1% de la radiación solar incidente) en el embalse para la estación 1 varió entre los 3.51 m en febrero y 6.21 m en julio con un promedio de 4.6 ± 0.84 m de profundidad en la columna de agua. En la estación 2, los valores de la zona eufótica variaron entre los 4.32 m en enero y 8.64 m en julio, con un promedio de 5.96 ± 1.68 m de profundidad en la columna de agua.

El promedio anual del coeficiente de atenuación vertical de la radiación (k_d) de la zona eufótica (Z_{EU}) para E1 fue de $1.02 \pm 0.18 \text{ m}^{-1}$, con un valor mínimo de 0.73 m^{-1} y máximo de 1.30 m^{-1} correspondientes a los meses de julio y febrero donde se alcanzaron la mayor y menor profundidad de Z_{EU} , respectivamente. El promedio anual para E2 fue de 0.82 ± 0.21 , con un valor mínimo de 0.53 m^{-1} y máximo de 1.06 m^{-1} correspondientes a los meses de julio y febrero, respectivamente. En E1 se encontró una correlación significativa ($p<0.05$) entre la transparencia del agua y el coeficiente de

atenuación de la luz ($r=0.787$). En E2 también se encontró una correlación significativa ($p<0.05$) entre la transparencia del agua y el coeficiente de atenuación de la luz ($r=0.97$).

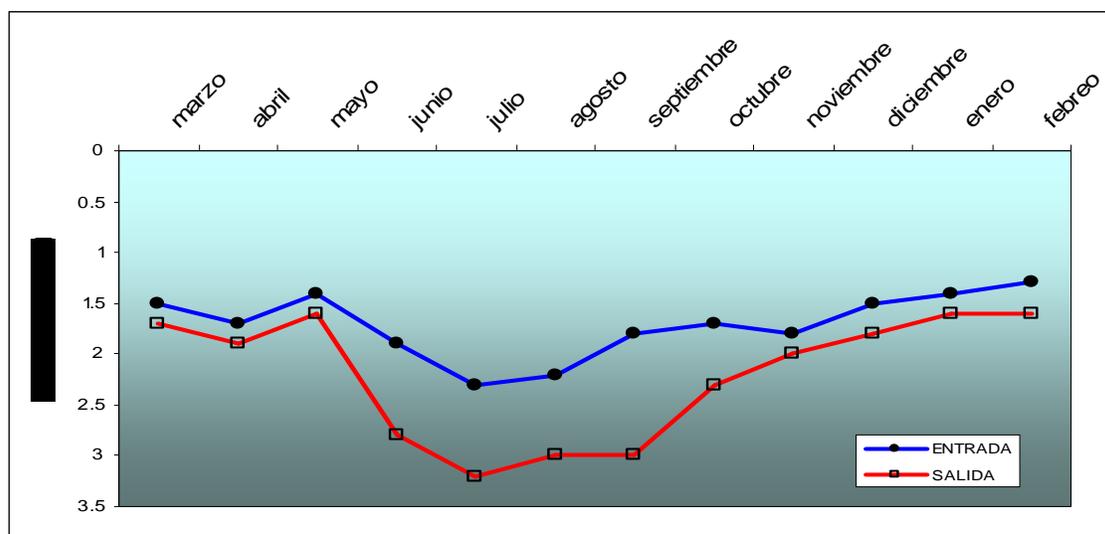


Figura 4. Variación estacional de la transparencia estimada de marzo de 2004 a febrero de 2005 mediante el disco de Secchi, para las dos estaciones en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Temperatura

La figura 5 muestra las isotermas en E1 del embalse Guajataca durante el periodo de estudio. La temperatura promedio para E1 en la columna de agua fue de 26.67 ± 0.75 °C, con una mínima en enero y máxima en julio. El promedio superficial fue de 27.8 ± 1.56 °C, y la del fondo, a 10 m de profundidad fue de 25.6 ± 0.38 °C. Durante la época de lluvias el embalse registró una diferencia vertical de temperatura hasta de 4.3 °C entre la superficie y el fondo, originando una estratificación térmica en la columna de agua con un perfil clinogrado, donde se forma una leve termoclina entre

los 2 y 6 metros aproximadamente en junio y julio. Se observó el inicio de la estratificación a finales de marzo cuando inicia el calentamiento de las capas superficiales en verano. Este calentamiento fue progresivo hasta los 6 metros de profundidad hasta producir en julio una estructura estable en la que se puede distinguir:

- De los 0 a los 2 m, una zona equivalente al epilimnion con temperatura desde los 28.1 en superficie a 27 °C a 2 m de profundidad.
- De los 2 a 6 m el metalimnion con un gradiente térmico de 1 °C m⁻¹ en julio.
- A partir de los 6 m inicia una zona equivalente al hipolimnion con una temperatura de 26.5 °C, bajando a 25.7 °C a los 10 metros de profundidad.

De acuerdo a los perfiles térmicos se observó un descenso progresivo en la columna de agua con perfil ortogrado en los meses de diciembre, enero y febrero, originando un periodo de mezcla parcial en el mes de febrero, cuando la diferencia máxima de superficie a fondo fue de 0.7 °C.

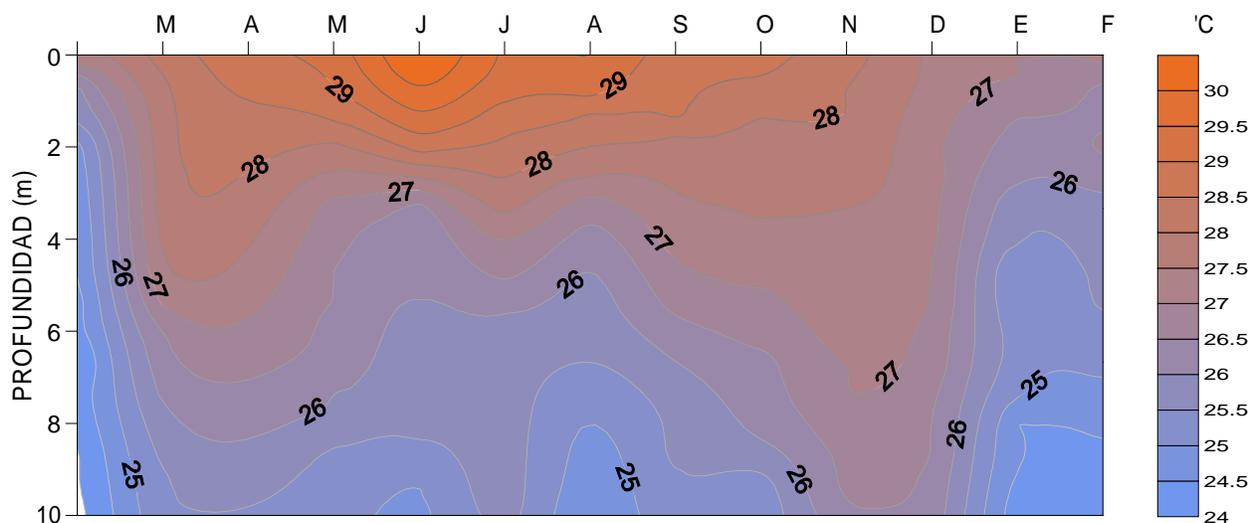


Figura 5. Distribución de la temperatura en (°C), en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1 en el embalse Guajataka, Puerto Rico.

La figura 6 muestra las isotermas en E2 del embalse Guajataca durante el periodo de estudio. La temperatura promedio en la columna de agua fue de 26.63 ± 0.78 °C, con mínima en enero y máxima en agosto. El promedio de temperatura superficial fue de 28.1 ± 1.62 °C y la del fondo, a 26 m de profundidad fue de 25.4 ± 0.52 °C. La estratificación térmica en la columna de agua para E2 es más evidente, la diferencia de superficie a fondo es de hasta 5.4 °C, por lo tanto la diferencia en las capas por cambios en la densidad del agua es mayor que en E1. Una termoclina se forma a mayor profundidad y se encuentra entre los 4 y 10 metros aproximadamente. El calentamiento fue progresivo hasta los 10 metros hasta producir en julio una estructura estable en la que se puede distinguir:

- De los 0 a los 4 m, el epilimnion con temperatura desde los 29.6 en superficie a 29 °C a 4 m de profundidad.
- De los 4 a 10 m el metalimnion con un gradiente térmico de 0.6 °C m^{-1} en agosto.
- A partir de los 10 m inicia el hipolimnion con una temperatura de 27.1 °C bajando a 25.5 °C a los 26 metros de profundidad.

La prueba de ANOVA indicó que no hubo diferencias significativas entre los valores de temperatura entre ambas estaciones ($F=0.71$, $p>0.05$). No se presentaron diferencias estadísticas al comparar la temperatura superficial entre estaciones.

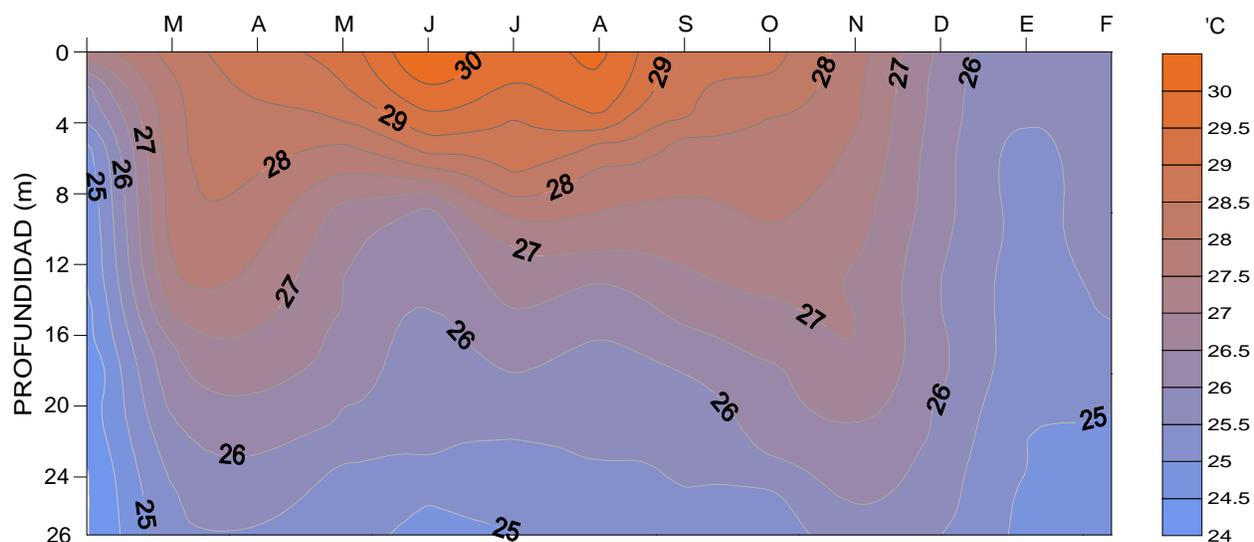


Figura 6. Distribución de la temperatura en (°C), en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Oxígeno disuelto

La figura 7 muestra las isopletas de las concentraciones de oxígeno disuelto (O_2) en E1 durante el período de estudio. El promedio de O_2 en la columna de agua fue de 4.8 ± 0.61 mg/l. La concentración promedio en la superficie fue de 7.61 ± 0.72 mg/l y en el fondo de 2.26 mg/l ± 1.3 mg/l. Las isolíneas de la figura 7 nos permiten observar una leve estratificación del oxígeno (oxiclina) en el periodo de verano, como proceso subsiguiente de la estratificación térmica donde se observa un agotamiento del oxígeno en el hipolimnion.

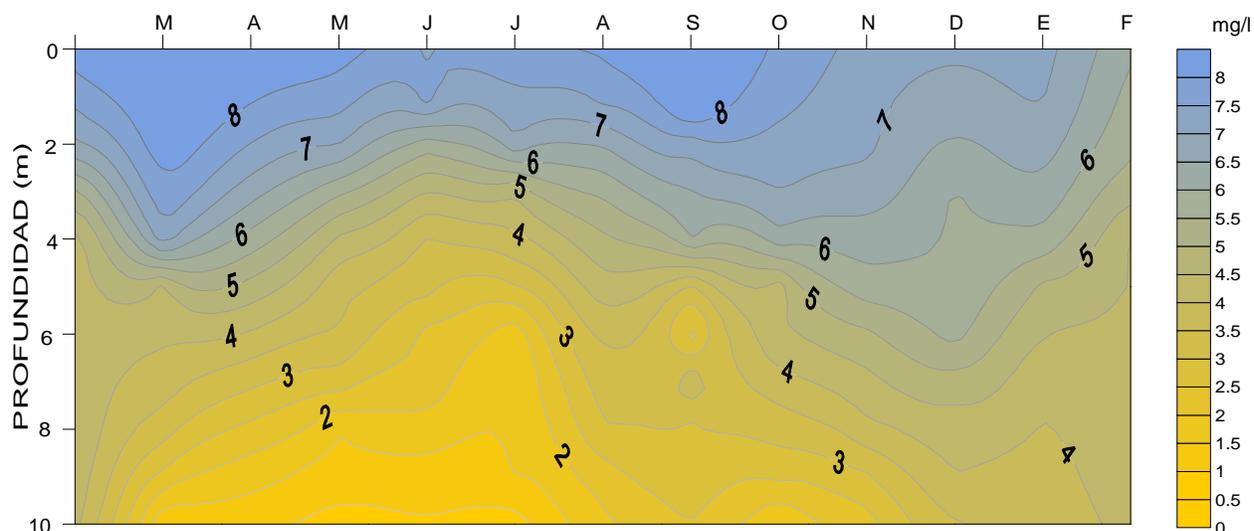


Figura 7. Distribución del oxígeno disuelto en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Las diferencias mayores en la columna de agua se presentaron en los meses de julio y agosto, con concentraciones de oxígeno disuelto superiores a los 7 mg/l en el epilimnion y condiciones hipóxicas en el fondo con concentraciones de O.D inferiores a los 1 mg/l. En los meses fríos y secos desde diciembre a marzo se observa una tendencia a la mezcla, formándose una columna homogénea, donde la diferencia promedio entre la superficie y el fondo es de 3.02 mg/l.

El promedio de O_2 en la columna de agua para la estación 2 fue de 3.18 ± 0.69 , con mínimo durante la estratificación plena en agosto y máximo en febrero, periodo de circulación. La concentración promedio en la superficie fue de 7.52 ± 0.49 mg/l y en el fondo de $1.12 \text{ mg/l} \pm 0.79 \text{ mg/l}$. Las isolíneas de la figura 8 indican una marcada estratificación del oxígeno disuelto (oxiclina) hasta los 8 m de profundidad. El patrón térmico también se reflejó en la distribución del oxígeno en la columna de agua donde se formaron capas aisladas de diferentes concentraciones. En la medida que avanzó

la estratificación el oxígeno fue agotándose en el hipolimnion, alcanzando valores por debajo de 1 mg/l a partir de los 10 metros de profundidad en el periodo de estratificación completa desde mayo hasta octubre. No se presentaron diferencias estadísticas entre estaciones ($F=0.28$, $p>0.05$).

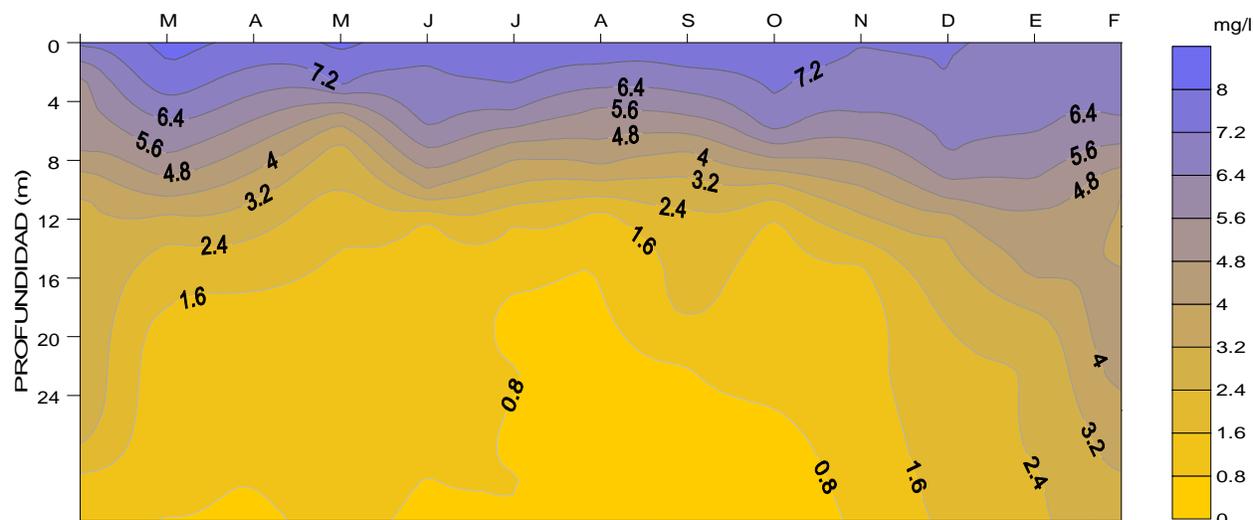


Figura 8. Distribución del oxígeno disuelto en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

pH

El pH en la columna de agua para E1 durante el periodo de estudio fue ligeramente alcalino con un promedio de 7.58 ± 0.09 , con valores máximos en julio (7.69 ± 0.46) y mínimos en marzo (7.44 ± 0.19) (figura 9). La variación promedio superficial fue 8.12 ± 0.29 unidades de pH, con mínimas en enero (7.76) y máximas en junio (8.56). La variación promedio del fondo fue de 7.1 ± 0.10 con mínimas en septiembre (7.02) y máximas en enero (7.49). Los mayores valores siempre se registraron en los estratos superficiales, que siempre estuvieron bien oxigenados con

valores superiores a 7.6 en el epilimnion. Después de los 10 metros de profundidad se registraron los valores más bajos en el hipolimnion pero siempre mayores de 7. La diferencia promedio entre el epilimnion y el hipolimnion fue de 0.93 unidades.

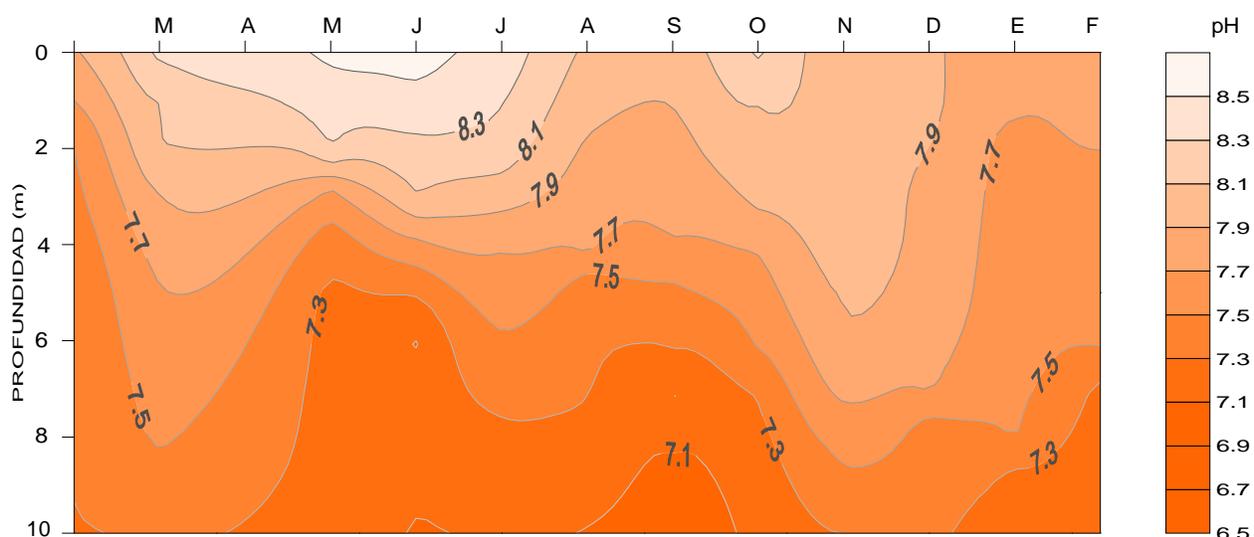


Figura 9. Distribución del pH en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 el pH en la columna de agua tuvo un promedio de 7.57 ± 0.16 , con un valor máximo en octubre (7.87 ± 0.42) y mínimos en enero (7.45 ± 0.12) (Figura 10). La variación promedio superficial fue de 8.07 ± 0.27 , con mínima en enero (7.68) y máxima en junio (8.43) (figura 10). La variación promedio del fondo fue de 7.01 ± 0.17 , con mínima en enero (7.76) y máxima en junio (8.56). Al igual que en la estación 1, los valores máximos siempre se registraron en los estratos superficiales con valores superiores a 7.5 en el epilimnion. Después de los 20 m se observaron los valores más bajos en el hipolimnion, inferiores a 7. La diferencia entre la superficie y el fondo fue de

1.06 unidades. No se presentaron diferencias estadísticas en las medidas de pH entre estaciones ($F=0.01$, $p>0.05$).

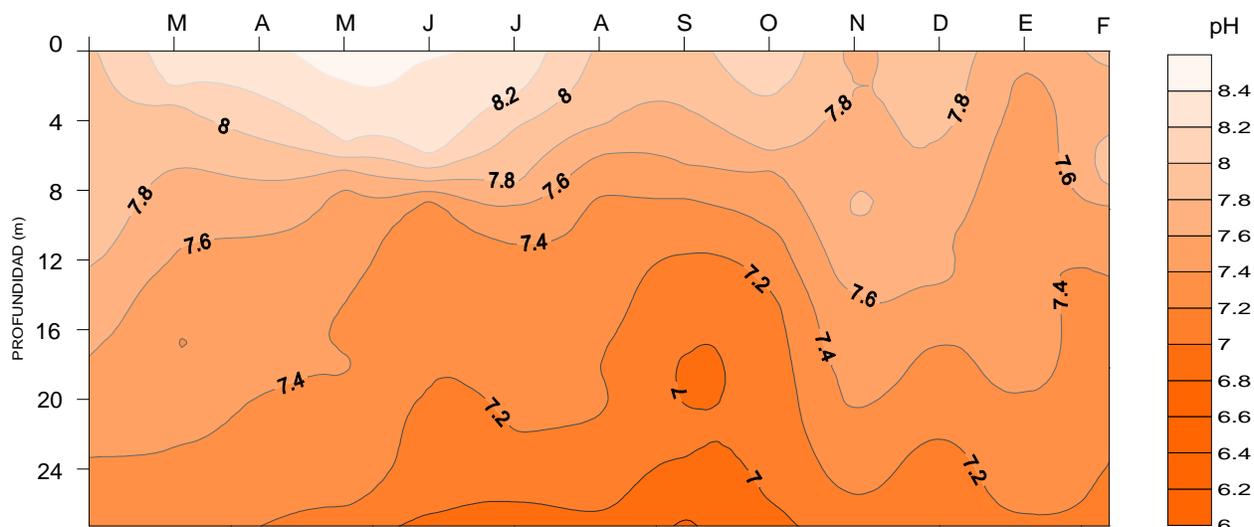


Figura 10. Distribución del pH en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Conductividad

La conductividad promedio en la columna de agua para E1 fue de $290.2 \pm 14.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ con mínimo en abril ($266.1 \pm 22.5 \mu\text{S cm}^{-1}$) y máximo en enero ($314.7 \pm \mu\text{S cm}^{-1}$) (figura 11). La variación promedio de la conductividad en la superficie fue de $272.1 \pm 24.1 \mu\text{S cm}^{-1}$, con mínima en junio ($231.3 \mu\text{S cm}^{-1}$) y máxima en enero ($309 \mu\text{S cm}^{-1}$); mientras que en el fondo fue de $318.1 \pm 18.11 \mu\text{S cm}^{-1}$, con mínima en abril ($297.2 \pm 3 \mu\text{S cm}^{-1}$) y máxima en julio ($360.1 \mu\text{S cm}^{-1}$). La diferencia promedio entre la superficie y el fondo fue de $46 \mu\text{S cm}^{-1}$.

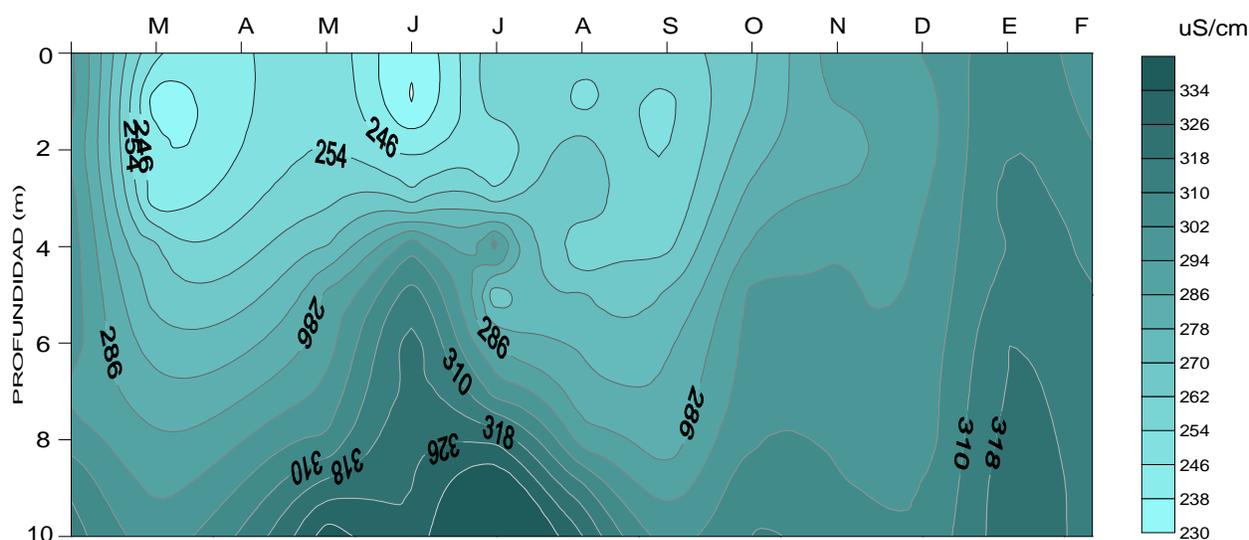


Figura 11. Distribución de la conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la conductividad promedio en la columna de agua fue de $295.6 \pm 8.6 \mu\text{S cm}^{-1}$ con un mínimo en septiembre ($285.2 \pm 17.88 \mu\text{S cm}^{-1}$) y máxima en enero ($309.8 \pm 8.3 \mu\text{S cm}^{-1}$) (Figura 12). La variación promedio en la superficie fue de $272.9 \pm 19.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ con mínima en junio ($233 \mu\text{S cm}^{-1}$) y máxima en febrero ($300.1 \mu\text{S cm}^{-1}$); mientras que en el fondo del embalse a 26 m de profundidad, el promedio fue de $321.5 \pm 15.6 \mu\text{S cm}^{-1}$, con mínima en abril ($302 \mu\text{S cm}^{-1}$) y máxima en agosto ($355 \mu\text{S cm}^{-1}$). La diferencia promedio entre la superficie y el fondo fue de $48.6 \mu\text{S cm}^{-1}$. No hubo diferencias estadísticas significativas entre los valores de conductividad de las dos estaciones ($F=0.9$, $p>0.05$).

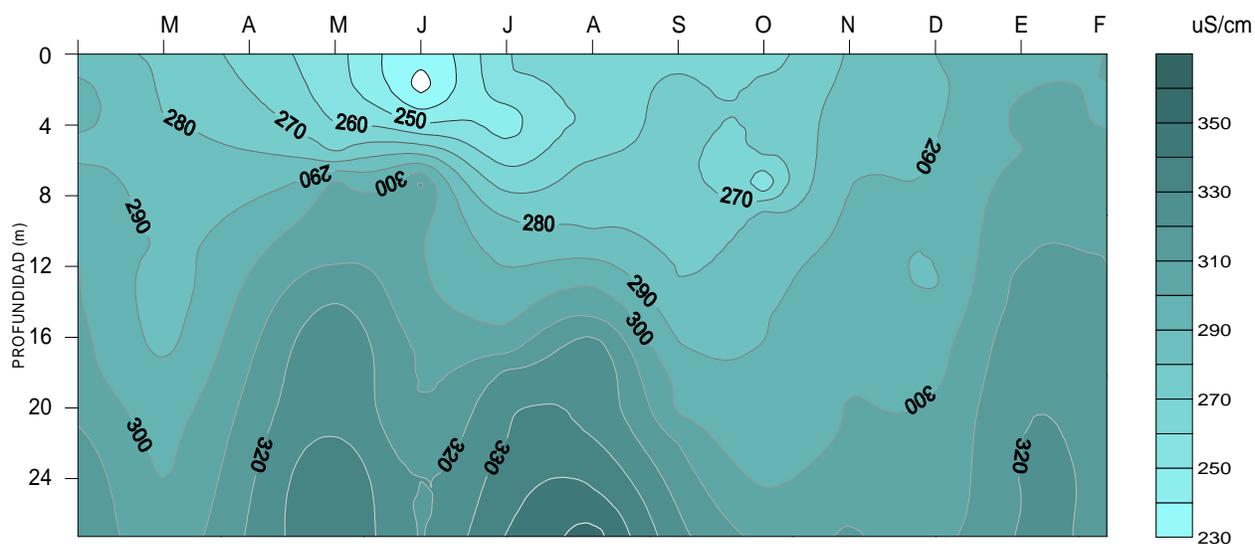


Figura 12. Distribución de la conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Turbidez

Durante el periodo de estudio, la turbidez en la columna de agua fue baja, con valores promedio de 4.63 ± 3.17 NTU, con valores mínimos en octubre (2.80 NTU) y máximos en septiembre (9.49 NTU) (figura 13). La variación promedio superficial fue de 2.8 ± 1.81 NTU con mínimos en octubre (1.2 NTU) y máximos en septiembre (5.67 NTU). La variación promedio a 5 metros de profundidad fue de 6.88 ± 5.41 NTU, con mínimos en julio (2.83 NTU) y máximos en septiembre (13.48 NTU). La diferencia promedio entre la superficie y el límite de la zona fótica fue de 4.08 NTU.

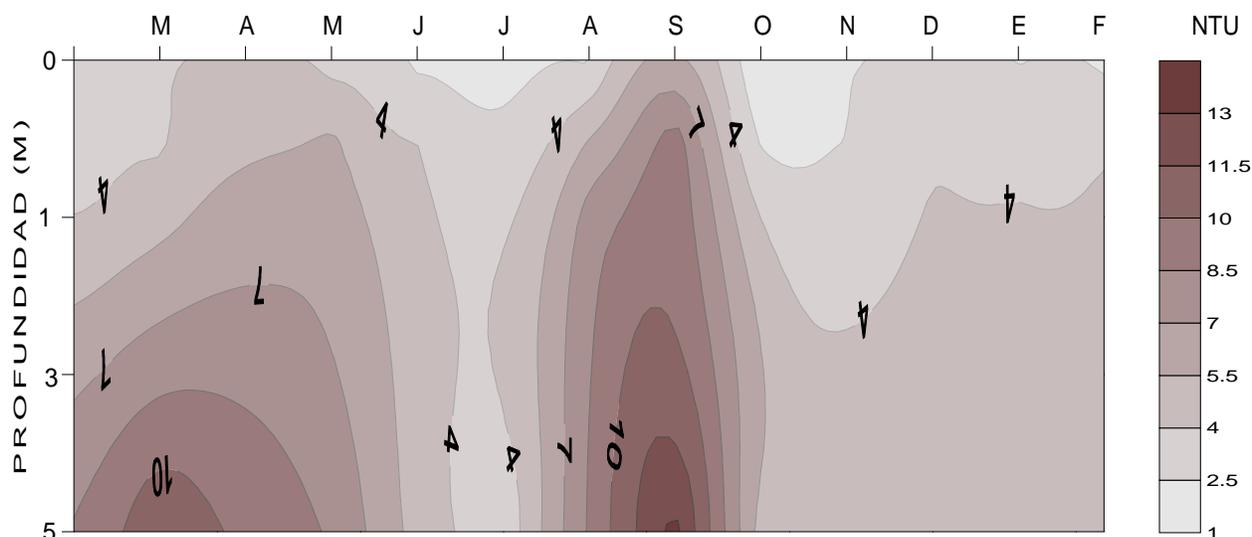


Figura 13. Distribución de la turbidez en NTU, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la turbidez promedio para la zona fótica fue de 2.27 ± 0.96 NTU, con valores máximos en mayo (4.2 NTU) y mínimos en julio (0.85 NTU). La variación promedio en la superficie fue de 2.87 ± 0.86 NTU, con mínimos en octubre (0.87 NTU) y máximos en septiembre (3.23 NTU) (figura 24); mientras que en el límite de la zona fótica a 6 metros de profundidad fue de 2.36 ± 0.88 NTU con mínimos en octubre (0.81 NTU) y máximos en septiembre (5.83 NTU). La diferencia promedio entre la superficie y a 6 metros de profundidad fue de 0.51 NTU (figura 14). Se presentaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de turbidez ($F=11.61$, $p < 0.05$) entre estaciones.

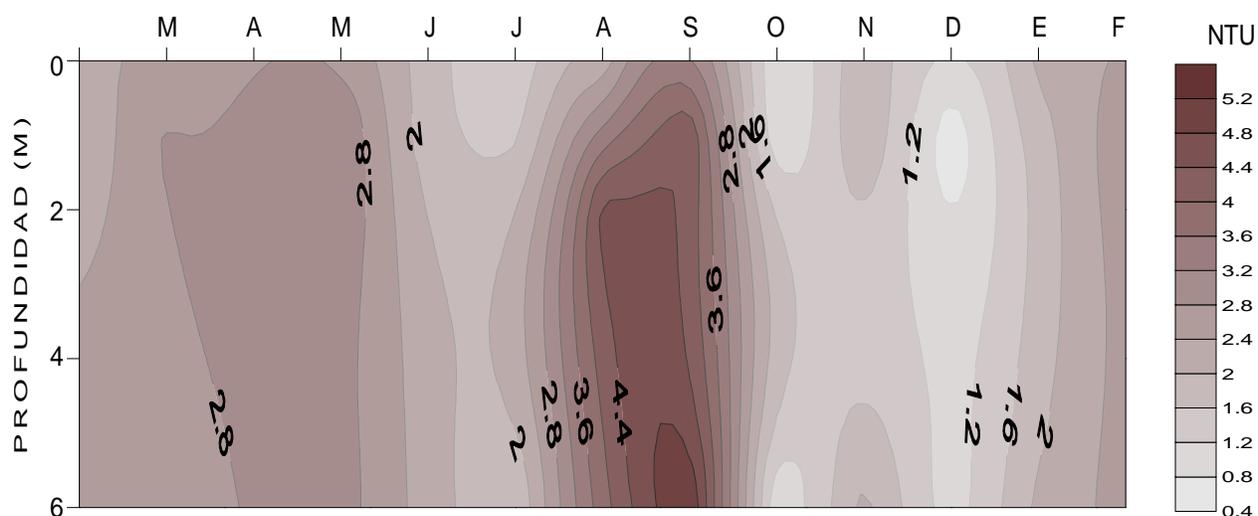


Figura 14. Distribución de la turbidez en NTU, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos en la zona fótica para E1 durante el periodo de estudio fueron relativamente bajos con valores promedio de 4.37 ± 3.08 mg/l, valores máximos en marzo (13.6 mg/l) y mínimos de 0.8 mg/l en junio. La variación promedio superficial fue de 3.33 ± 3.07 mg/l, con mínimos en abril (1.23 mg/l) y máximos en septiembre (5.56 mg/l). La variación promedio a 6 metros de profundidad fue de 5.87 ± 3.48 mg/l con mínimos en octubre (1.79 mg/l) y máximos en septiembre (11.67 mg/l). La diferencia promedio entre la superficie y el límite de la zona fótica fue de 2.54 mg/l (Figura 15).

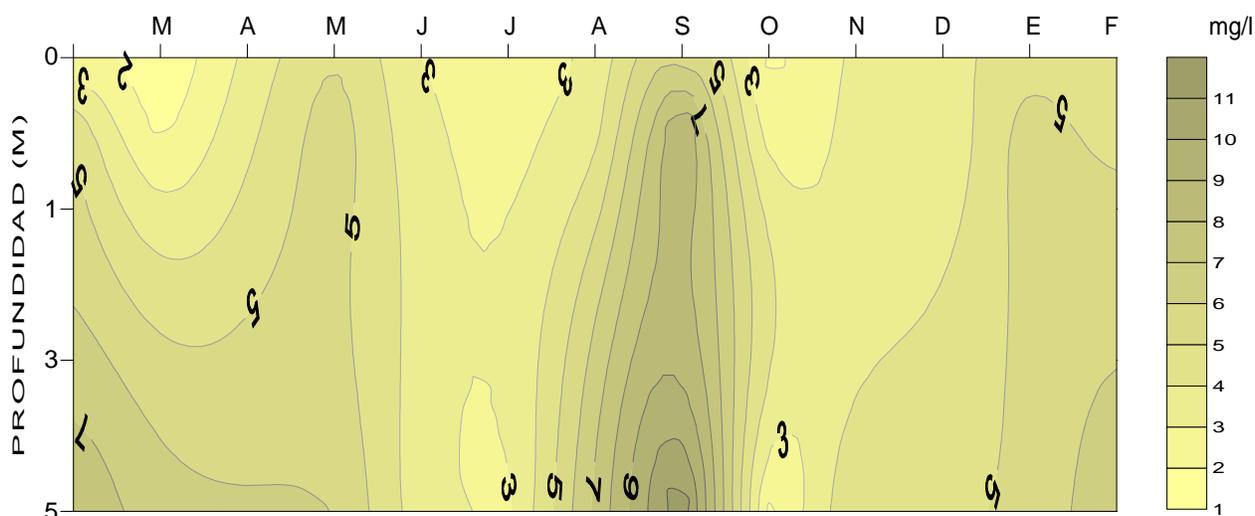


Figura 15. Distribución de los sólidos suspendidos en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la concentración promedio de sólidos suspendidos en la columna de agua en la zona fótica fue de 3.26 ± 4.59 mg/l, con valores mínimos en abril (1.33 mg/l) y máximos en septiembre (5.39 mg/l). La variación promedio en la superficie fue de 2.27 ± 2.25 mg/l, con valores mínimos en octubre (0.94 mg/l) y máximos en septiembre (3.31 mg/l); mientras que en el límite de la zona fótica, a 6 metros de profundidad, fue de 3.79 ± 6.29 mg/l, con mínimos en abril (1.3 mg/l) y máximos en septiembre (7.85 mg/l) (figura 16). No se presentaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de sólidos suspendidos entre estaciones ($F=3.30$, $p>0.05$).

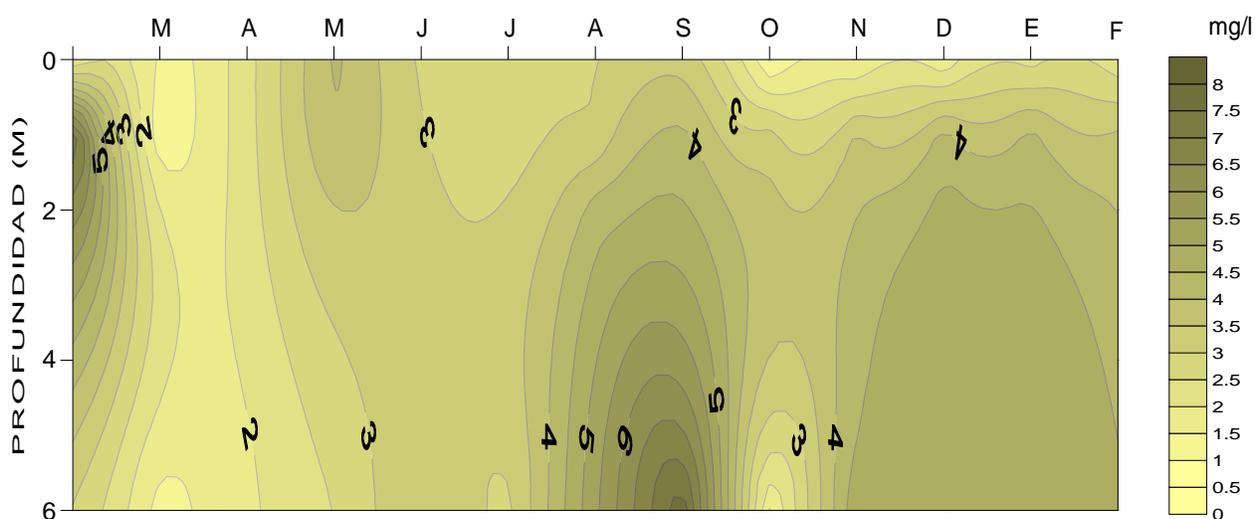


Figura 16. Distribución de los sólidos suspendidos en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Nitrógeno Total

La concentración promedio de nitrógeno total Kjeldal (NTK) en la zona fótica para E1 fue de 0.51 ± 0.16 mg/l, con mínimo en febrero (0.242 mg/l) y máximo en agosto (1.43 mg/l). La variación promedio en la superficie fue de 0.45 ± 0.16 mg/l, con mínima en febrero (0.247 mg/l) y máxima en mayo (0.60 mg/l); mientras, la concentración promedio de (NT) en el límite de la zona fótica a 5 metros de profundidad, fue de 0.42 ± 0.14 mg/l, con mínima en febrero (0.19 mg/l) y máxima en agosto (0.698 mg/l). La diferencia promedio entre la superficie y el límite de la zona fótica fue de 0.03 mg/l (figura 17).

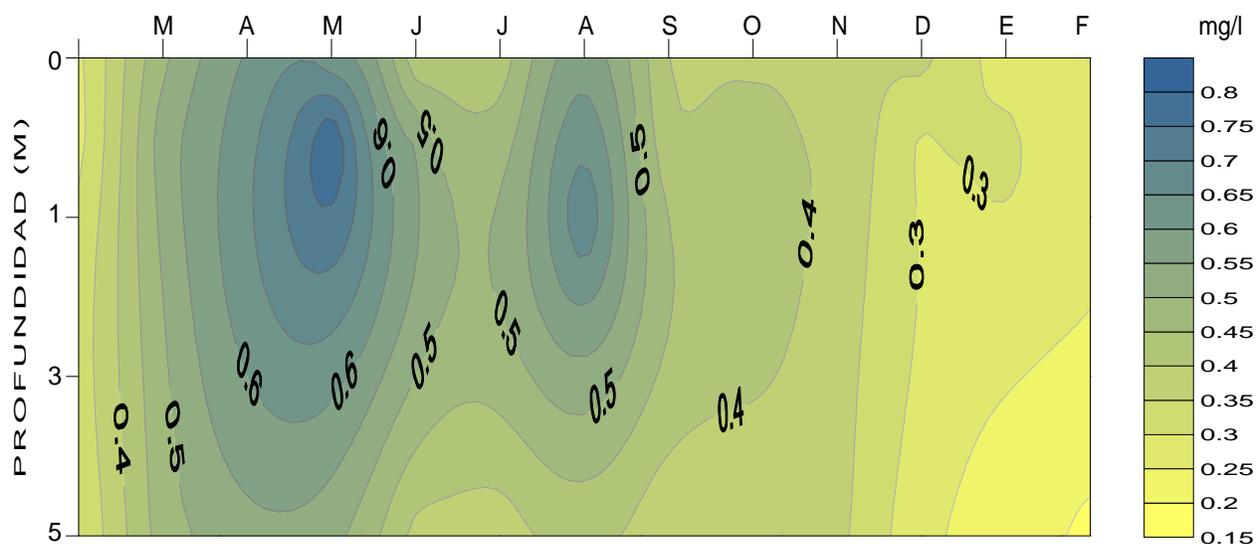


Figura 17. Distribución de la concentración de nitrógeno total, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la concentración promedio de nitrógeno total en la zona fótica fue de 0.3599 ± 0.12 mg/l, con un mínimo en febrero (0.19 mg/l) y máxima en mayo (0.477 mg/l) (figura 18). La variación promedio en la superficie fue de 0.35 ± 0.13 mg/l, con mínima en marzo (0.21 mg/l) y máxima en mayo (0.47 mg/l); mientras que en el límite de la zona fótica a 6 metros de profundidad, fue de 0.35 ± 0.10 mg/l con mínima en febrero (0.17 mg/l) y máxima en agosto (0.524 mg/l) (figura 18). Se determinó una diferencia estadísticamente significativa en los valores de nitrógeno total entre estaciones ($F=6.49$, $p<0.05$).

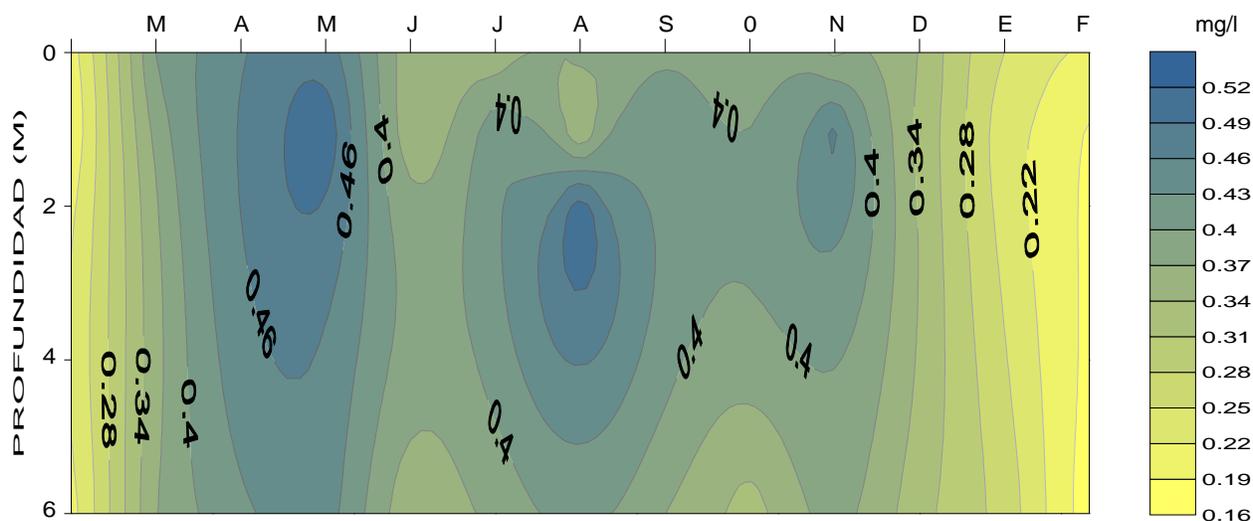


Figura 18. Distribución de la concentración de nitrógeno total en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Fósforo total

La concentración promedio de fósforo total en la zona fótica para E1 fue de 0.047 ± 0.022 mg/l con mínimo en marzo (0.022 mg/l) y máximo en agosto (0.109 mg/l). La variación promedio en la superficie fue 0.039 ± 0.021 mg/l con mínima en febrero (0.019 mg/l) y máxima en agosto (0.063 mg/l); mientras que en límite de la zona fótica a 5 metros de profundidad, fue de 0.041 ± 0.017 mg/l, con mínima en enero (0.023 mg/l) y máxima en abril (0.047 mg/l). La diferencia promedio entre la superficie y el límite de la zona fótica fue de 0.02 mg/l (figura 19).

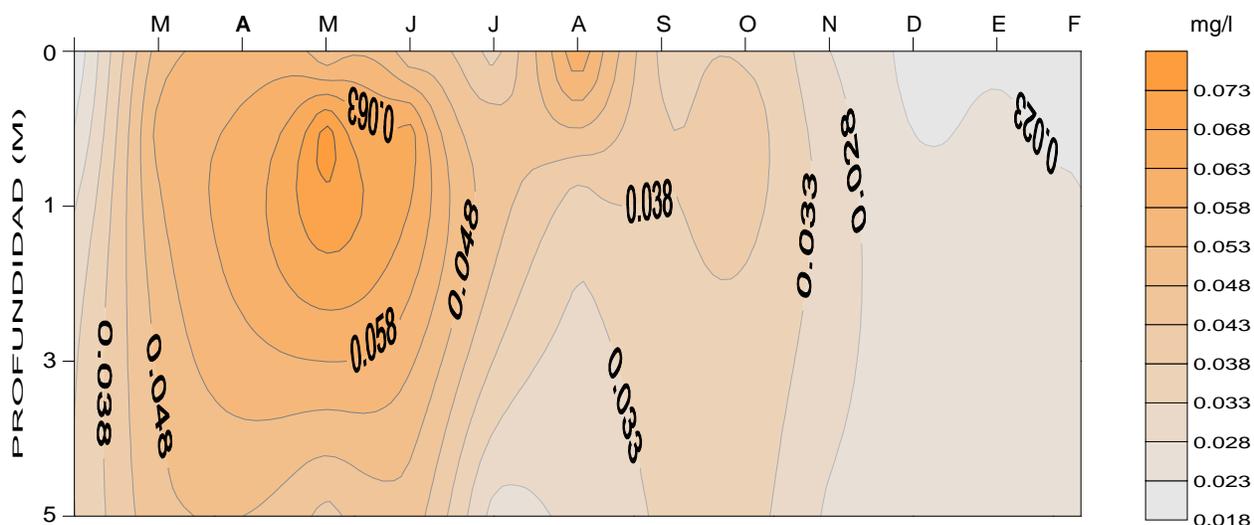


Figura 19. Distribución de la concentración de fósforo total en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la concentración promedio de fósforo total en la zona fótica fue de 0.02412 ± 0.096 mg/l, con un mínimo en febrero (0.014 mg/l) y máxima en junio (0.032 mg/l). La variación promedio en la superficie fue 0.026 ± 0.010 mg/l, con mínima en marzo (0.015 mg/l) y máxima en junio (0.030 mg/l); mientras que en el límite de la zona fótica, a 6 metros de profundidad, fue de 0.024 ± 0.0092 mg/l, con mínima en febrero (0.012 mg/l) y máxima en junio (0.033 mg/l). La variación promedio entre la superficie y el límite de la zona fótica fue de 0.02 mg/l (Figura 20). Se determinó una diferencia estadísticamente significativa en los valores de fósforo total entre estaciones ($F=7.17$, $p < 0.05$).

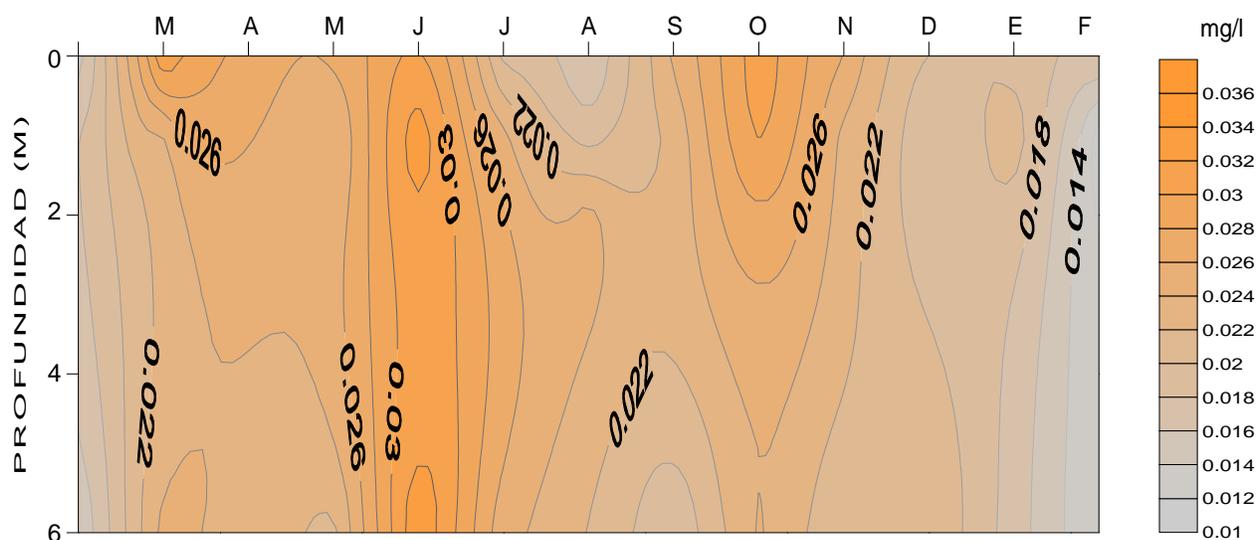


Figura 20. Distribución de la concentración de fósforo total en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Fósforo disponible

La concentración promedio de fósforo disponible en la zona fótica para E1 fue de 0.015 ± 0.011 mg/l, con valores mínimos en febrero y marzo (0.002 mg/l) y máximo en agosto (0.026 mg/l). La variación promedio en la superficie fue 0.0123 ± 0.0086 mg/l, con mínima en febrero (0.002 mg/l) y máxima en agosto (0.024 mg/l); mientras que el promedio en el límite de la zona fótica, a 5 metros de profundidad fue de 0.0098 ± 0.0080 mg/l, con mínima en enero (0.001 mg/l) y máxima en julio (0.025 mg/l). La diferencia promedio entre la superficie y el fondo fue de 0.0011 mg/l (figura 21).

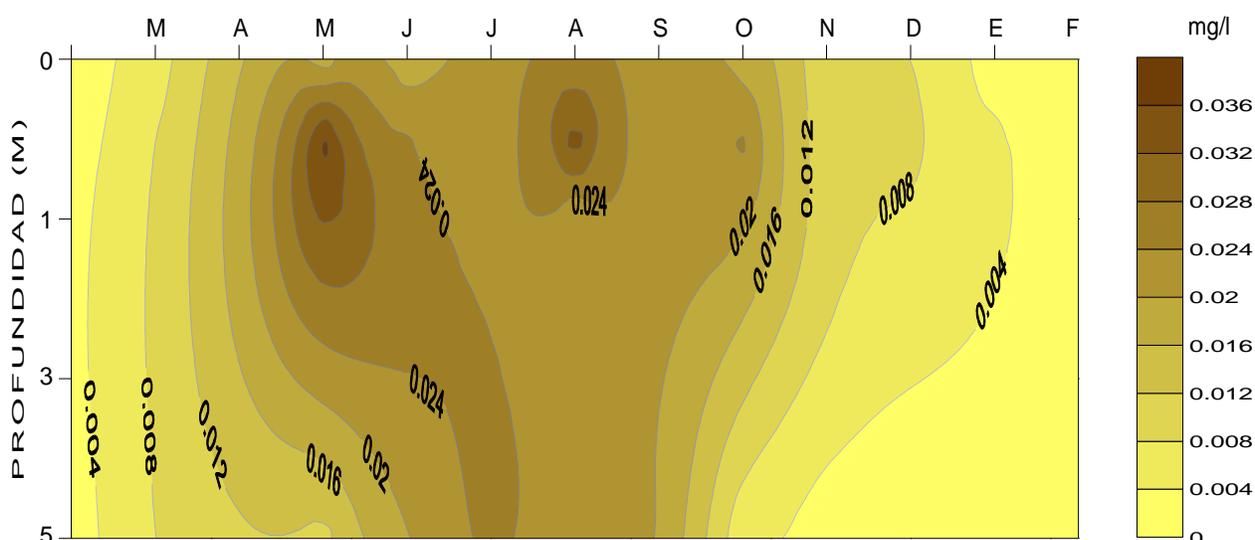


Figura 21. Distribución de la concentración de fósforo disponible en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la concentración promedio de fósforo disponible en la zona fótica fue de 0.0095 ± 0.0077 mg/l con valores no detectables en marzo y máxima en junio 0.027 mg/l. La variación promedio en la superficie fue 0.099 ± 0.0088 mg/l, con mínima en enero (0.001 mg/l) y máxima en julio (0.026 mg/l); mientras que en el límite de la zona fótica a 6 metros de profundidad, fue de 0.007 ± 0.0067 mg/l con valores no detectables en marzo y máxima en julio (0.022 mg/l) (Figura 22). Se determinó una diferencia estadísticamente significativa ($F=6.22$, $p<0.05$) en los valores de fósforo disponible entre estaciones.

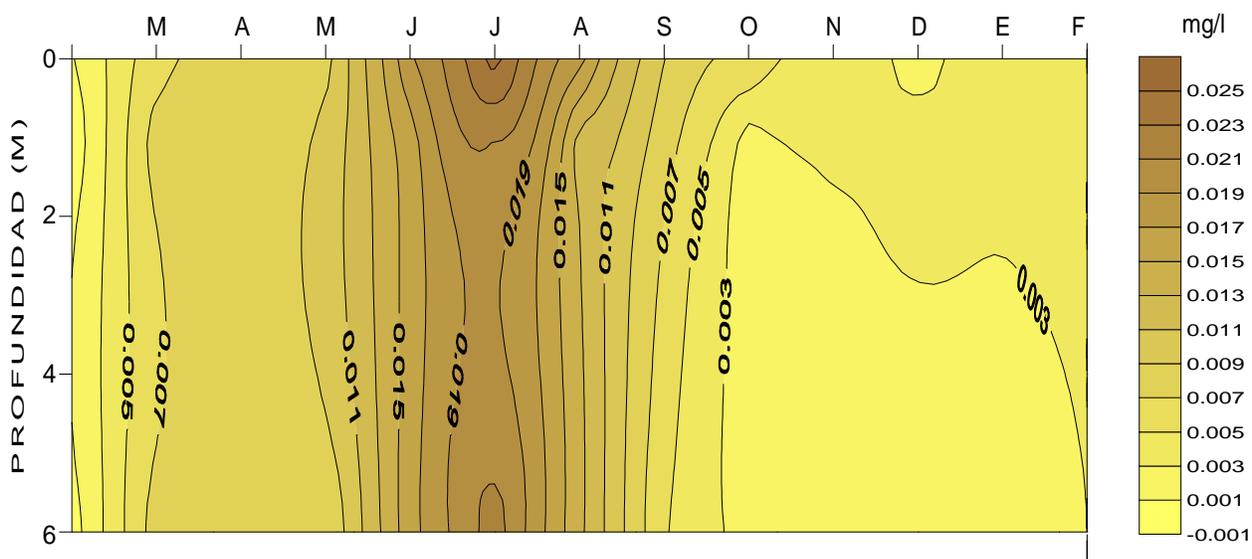


Figura 22. Distribución de la concentración de fósforo disponible en mg/l, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Clorofila a

La concentración de clorofila a para E1 osciló entre $9.85 \pm 10.62 \mu\text{g/l}$ en la superficie, con valores mínimos en marzo ($1.68 \mu\text{g/l}$) y máximos en mayo ($43.48 \mu\text{g/l}$). El promedio a 5 metros de profundidad fue de $5.07 \pm 4.37 \mu\text{g/l}$, con mínimos en febrero $2.16 \mu\text{g/l}$ y máximos en mayo ($8.34 \mu\text{g/l}$). El promedio para toda la columna de agua en la zona fótica alcanzó un valor promedio de $11.73 \pm 13.06 \mu\text{g/l}$, con valores máximos de $23.08 \mu\text{g/l}$ en mayo y mínimos $2.47 \mu\text{g/l}$ en enero. La diferencia promedio entre la superficie y 6 metros de profundidad fue de $4.78 \mu\text{g/l}$ (figura 23). Las concentraciones alcanzaron valores similares en toda la columna durante el periodo de circulación. Los picos más altos se obtuvieron en el periodo de lluvias y los mínimos en la época seca. La amplitud temporal del cambio de biomasa, expresada entre el

cociente de las concentraciones máximas y mínimas de clorofila *a* alcanzadas (= \log [clorofila *a* máxima]/[clorofila *a* mínima]) fue de 2.39.

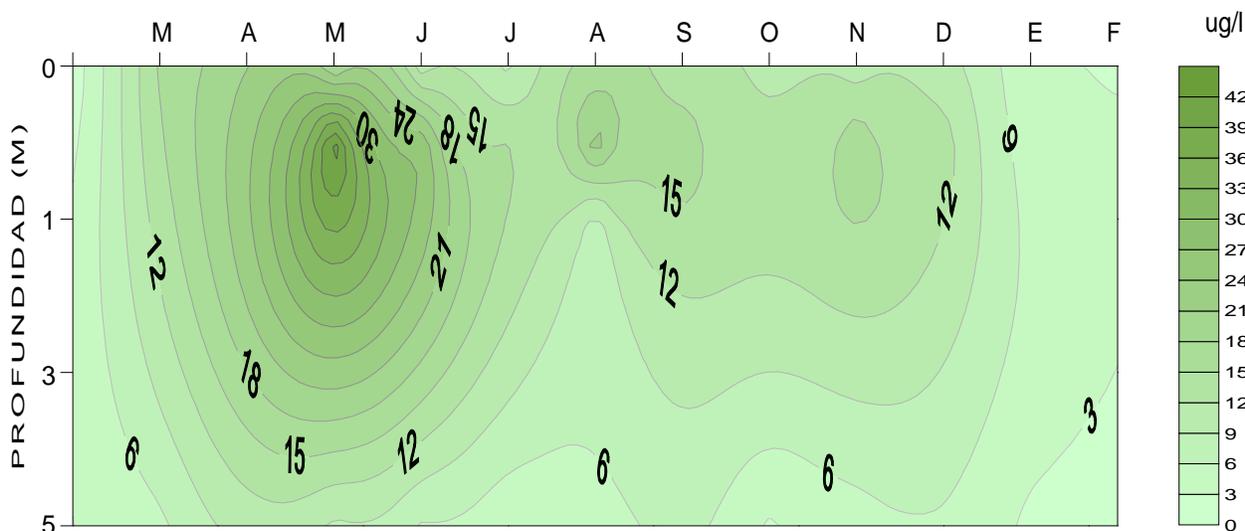


Figura 23. Distribución de la Clorofila *a*, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

La concentración de clorofila *a* para E2 osciló entre $6.86 \pm 11.18 \mu\text{g/l}$ en la superficie, con mínimos en febrero ($1.32 \mu\text{g/l}$) y máximos en mayo ($22.43 \mu\text{g/l}$). El promedio a 6 metros de profundidad fue de $9.23 \pm 19.6 \mu\text{g/l}$, con valores mínimos en marzo ($2.14 \mu\text{g/l}$) y máximos en mayo ($22.42 \mu\text{g/l}$). En la zona fótica ésta alcanzó un valor promedio de $7.68 \pm 13.17 \mu\text{g/l}$ con valores máximos de ($22.62 \mu\text{g/l}$) en mayo y mínimos ($2.21 \mu\text{g/l}$) en marzo (figura 24). La diferencia promedio entre la superficie y 6 metros de profundidad fue de $4.78 \mu\text{g/l}$. Al igual que en la estación 1, las concentraciones alcanzaron valores similares en toda la columna durante el periodo de circulación. En la estratificación o periodo de máxima penetración de luz, los valores de clorofila también fueron similares en la columna de agua desde los 0 metros a los 6 metros, límite de la zona fótica. Los picos más altos se obtuvieron en el periodo de

lluvias y los mínimos en la época seca. La amplitud temporal del cambio de biomasa, expresada entre el cociente de las concentraciones máximas y mínimas de clorofila *a* alcanzadas ($= \log [\text{clorofila } a \text{ máxima}]/[\text{clorofila } a \text{ mínima}]$) fue de 2.47. Se presentaron diferencias estadísticas entre estaciones ($F=9.03$, $p<0.05$). Se presentaron correlaciones positivas notables entre la concentración de clorofila *a* y la concentración de nitrógeno total Kjeldahl ($r=0.69$) (figura 27). La correlación entre la concentración de clorofila *a* con el fósforo total ($r=0.57$) (figura 28).

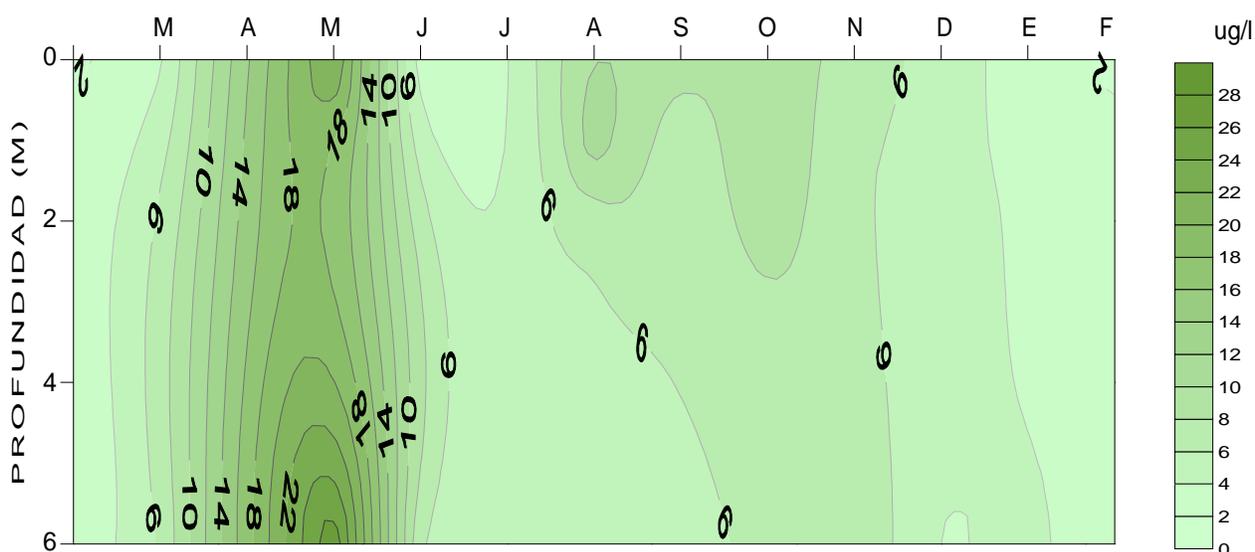


Figura 24 Distribución de la clorofila *a*, en función de la profundidad (ordenadas) y del tiempo (abscisas) para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Tabla 2. Variables físicas y químicas de la estación 1 (cola del embalse) y la estación 2 (presa), promedio de las profundidades.

Variable	Unidades	ESTACIÓN 1	ESTACIÓN 2
		Promedio \pm D.E	Promedio \pm D.E
Temperatura	°C	27.3 \pm 1.17	27.8 \pm 1.42
Oxígeno disuelto	mg/l	6.43 \pm 0.78	6.38 \pm 0.59
pH		7.87 \pm 0.23	7.99 \pm 0.26
Conductividad	μ S/cm	277 \pm 22.9	275.6 \pm 18.1
Nitrógeno total	mg/l	0.51 \pm 0.16	0.35 \pm 0.12
Fósforo total	mg/l	0.047 \pm 0.022	0.024 \pm 0.096
Fósforo disponible	mg/l	0.015 \pm 0.011	0.0095 \pm 0.0077
Clorofila <i>a</i>	μ g/l	11.73 \pm 13.06	7.68 \pm 13.17
Sólidos suspendidos	mg/l	4.37 \pm 3.08	3.26 \pm 4.59
Turbidez	NTU	4.63 \pm 3.17	2.27 \pm 0.96

Tabla 3. Variables físicas y químicas de 0 m, 1 m y 6 m de profundidad en la zona fótica, promedio para las dos estaciones.

Variable	Unidades	0 METROS	1 METRO	6 METROS
		Promedio \pm D.E	Promedio \pm D.E	Promedio \pm D.E
Temperatura	°C	27.9 \pm 1.59	27.8 \pm 1.41	26.9 \pm 0.88
Oxígeno Disuelto	mg/l	7.56 \pm 0.59	7.24 \pm 0.56	4.37 \pm 0.9
pH		8.09 \pm 0.28	8.01 \pm 0.25	7.69 \pm 0.21
Conductividad	μ S/cm	272.5 \pm 21.6	271.6 \pm 23.9	284.9 \pm 16.1
Nitrógeno total	mg/l	0.4 \pm 0.16	0.51 \pm 0.22	0.38 \pm 0.11
Fósforo Total	mg/l	0.032 \pm 0.015	0.043 \pm 0.021	0.031 \pm 0.014
Fósforo Disponible	mg/l	0.011 \pm 35.2	0.014 \pm 0.012	0.010 \pm 0.0075
Clorofila <i>a</i>	μ g/l	8.35 \pm 10.9	13.6 \pm 16.46	7.1 \pm 12
Sólidos Suspendidos	mg/l	2.8 \pm 2.66	3.81 \pm 3.97	4.83 \pm 4.88
Turbidez	NTU	2.48 \pm 1.33	3.28 \pm 1.71	4.59 \pm 3.14

Nutriente limitante: relación NT/PT

Las variaciones en el medio de la relación N/P informan en cada momento cuál de los dos elementos es el limitante. Si esta relación es mayor de 9 (en átomos) el P es el limitante; si es menor de 9, entonces el limitante sería el N. Se calculó la relación nitrógeno total – fósforo total ($N_T:P_T$) en las aguas del embalse Guajataca. Sólo en el mes de junio, en E1, la relación $N_T:P_T$ fue menor que 9 (figura 25). En E1, esta relación varió entre 8.5 y 13.3. En E2, en todo el periodo de estudio, la relación $N_T:P_T$ fue mayor y varió entre 10.8 y 20.5 (figura 26). Los promedios de la relación $N_T:P_T$ en cada estación fueron: E1 (11.34 ± 1.38) < E2 (15.6 ± 2.99).

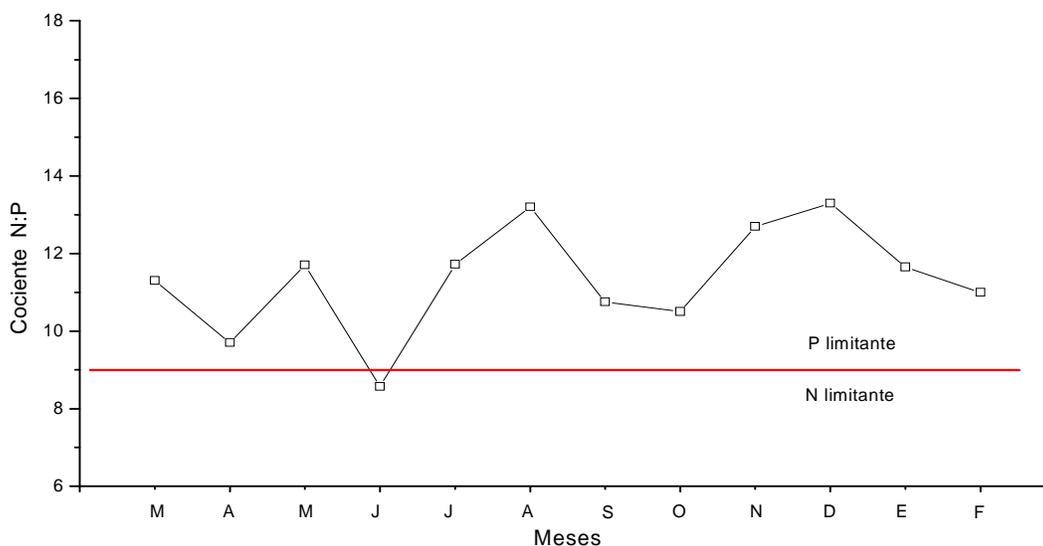


Figura 25. Valores medios de la relación N:P (mg/l) en el epilimnion de la estación 1, del embalse Guajataca.

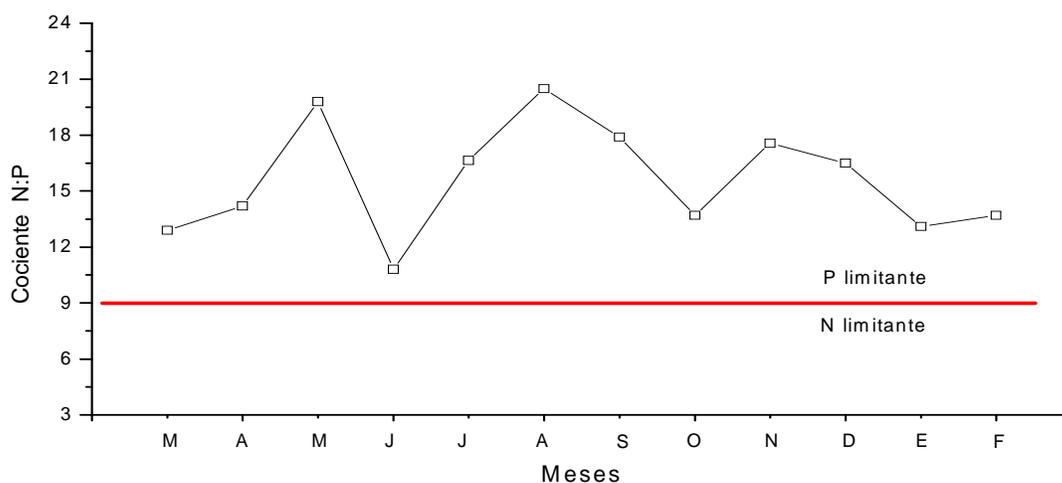


Figura 26. Valores medios de la relación N:P (mg/l) en el epilimnion de la estación 2, del embalse Guajataca.

Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson entre las variables fisicoquímicas para las dos estaciones de muestreo. El asterisco representa un valor significativo $p < 0.001$.

Parametro	Conjunto	Estación 1	Estación 2
Chl a – TKN	0.69*	0.8	0.5
Chl a – TP	0.57*	0.8	0.11
TKN – TP	0.74*	0.81	0.4
TKN – DP	0.63*	0.73	0.27
TP- DP	0.8*	0.82	0.76
Temp – pH	0.62*	0.62	0.62
OD – pH	0.74*	0.79	0.7
Turbidez - Transparencia	-0.5	-0.47	-0.62
Turbidez - S S	0.31	0.48	0.06

Tabla 5. Matriz de correlación de Pearson entre las variables fisicoquímicas para las tres profundidades. El asterisco representa un valor significativo $p < 0.001$.

Parámetros	Estación 1			Estación 2		
	0m	1m	5m	0m	1m	6m
Chl a – TKN	0.77*	0.84*	0.67	0.5	0.85*	0.48
Chl a – TP	0.83*	0.89*	0.38	0.36	0.38	-0.15
TKN – TP	0.74	0.94*	0.44	0.34	0.45	0.41
TKN – DP	0.62	0.9*	-0.02	0.14	0.43	0.27
TP- DP	0.89*	0.95*	0.25	0.59	0.86*	0.92
Temp – pH	0.65	0.41	0.04	0.54	0.44	0.26
DO – pH	0.45	0.62	0.5	-0.005	0.13	0.4
Turbidez–Transpa	-0.47	--	--	-0.62	--	--
Turbidez - Sólidos S	-0.14	0.35	0.77	0.38	0.3	-0.16

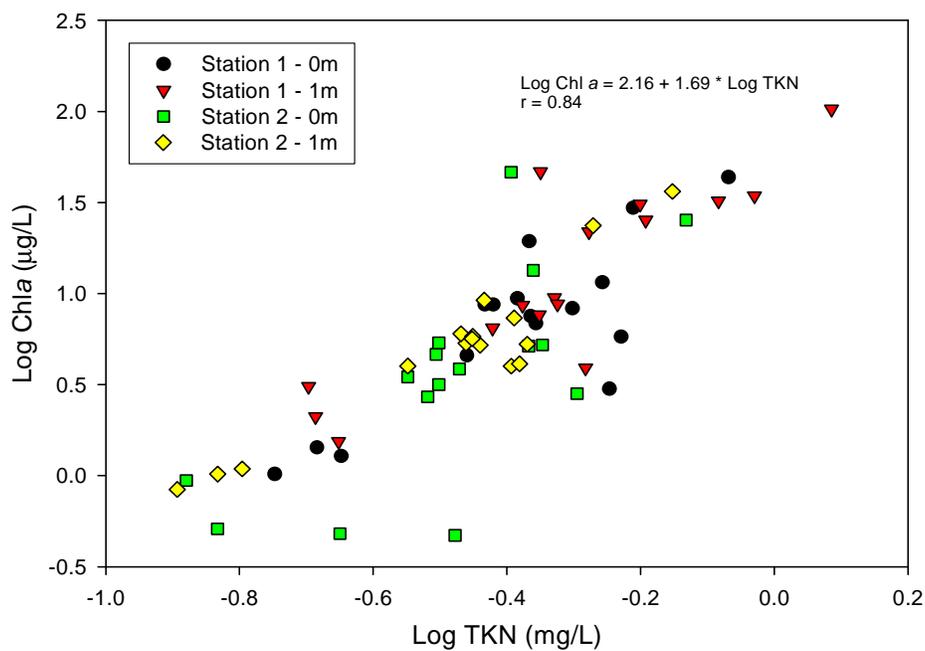


Figura 27. Relación entre nitrógeno total y clorofila a. Valores para las muestras de superficie y 1 metro de profundidad.

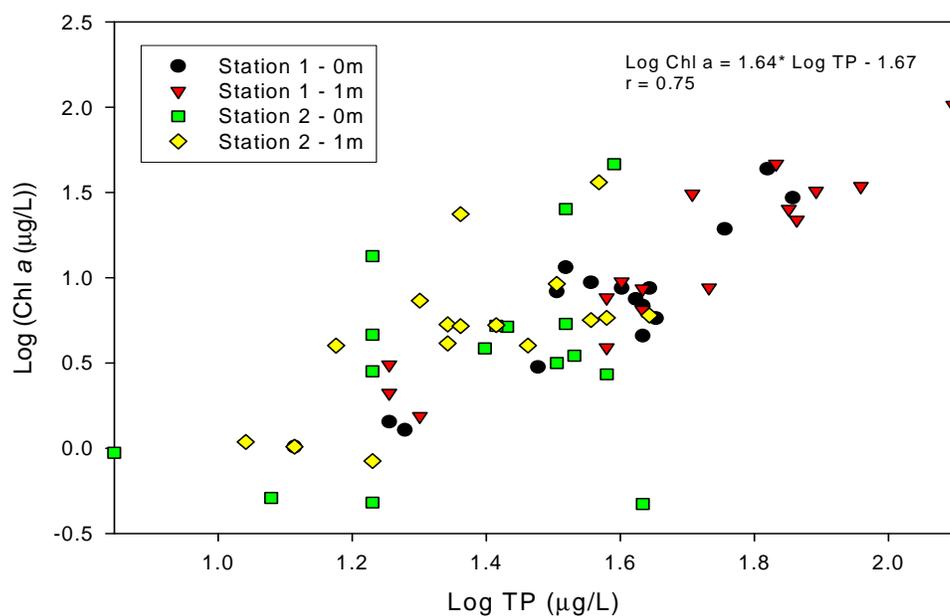


Figura 28. Relación entre fósforo total y clorofila a. Valores para las muestras de superficie y 1m de profundidad.

Índice de estado trófico

Para calcular el índice del estado trófico de Carlson (IET) (1977) se tuvo en cuenta los parámetros de la profundidad Secchi, la clorofila *a* y el fósforo total de la estación 2 por presentar los valores más estables durante el periodo de estudio y con características mas lacustres.

Promedio profundidad Secchi: 2.21 metros

$$\text{IET (PS)} = 10 \left[6 - \ln \text{PS} / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (PS)} = 10 \left[6 - \ln 2.21 / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (PS)} = 10 \left[6 - 1.16 \right]$$

$$\text{IET (PS)} = 48.3$$

Promedio clorofila *a*: 7.68 mg/l

$$\text{IET (cla a)} = 10 \left[6 - (2.04 - 0.68 \ln \text{cla a}) / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (cla a)} = 10 \left[6 - (2.04 - 0.68 \ln 7.68) / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (cla a)} = 10 \left[6 - (2.04 - 1.3) / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (cla a)} = 49.3$$

Promedio fósforo total: 0.024 mg/l

$$\text{IET (PT)} = 10 \left[6 - (\ln 48/\text{PT}) / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (PT)} = 10 \left[6 - (\ln 48/0.024) / \ln 2 \right]$$

$$\text{IET (PT)} = 10 \left[6 - (7.6 / \ln 2) \right]$$

$$\text{IET (PT)} = 10 \left[6 - (7.6 / \ln 2) \right]$$

$$\text{IET (PT)} = 50$$

El índice de estado trófico para la profundidad Secchi fue de 48.3, para la clorofila a fue de 49.3 y para el fósforo total fue de 50. Teniendo en cuenta la media del $\text{TSI} = (\text{TSI (DS)} + \text{TSI (Cla a)} + \text{TSI (P total)})/3$ igual a 49.2 (Figura 29). La puntuación del índice de Carlson confirma la valoración de mesotrofia del embalse Guajataca en la actualidad.

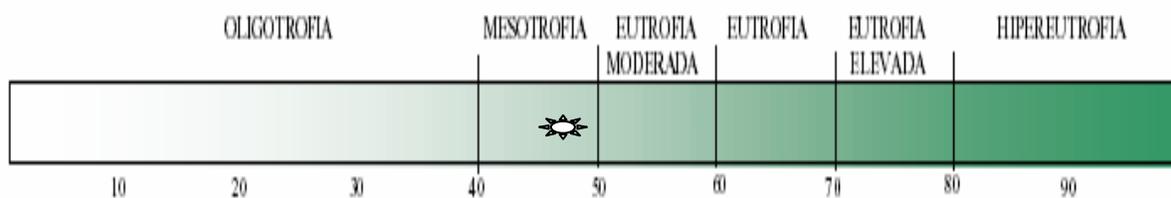


Figura 29. Puntuación del índice de Carlson para el embalse Guajataca (☼) con relación a la media de los valores de profundidad Secchi, clorofila a y fósforo total.

Con la concentración de clorofila *a* y la figura 30 se determinó la probabilidad porcentual de estado trófico del embalse Guajataca de acuerdo al modelo matemático de Vollenweider y Kerekes (1981). El valor promedio de clorofila *a* en el embalse es de 7.68 $\mu\text{g/l}$, que al ubicarlo en la curva probabilística de estado trófico (figura 30) se obtiene que el embalse se encuentra con un 63% de probabilidad de ser mesotrófico y un 23% de ser eutrófico.

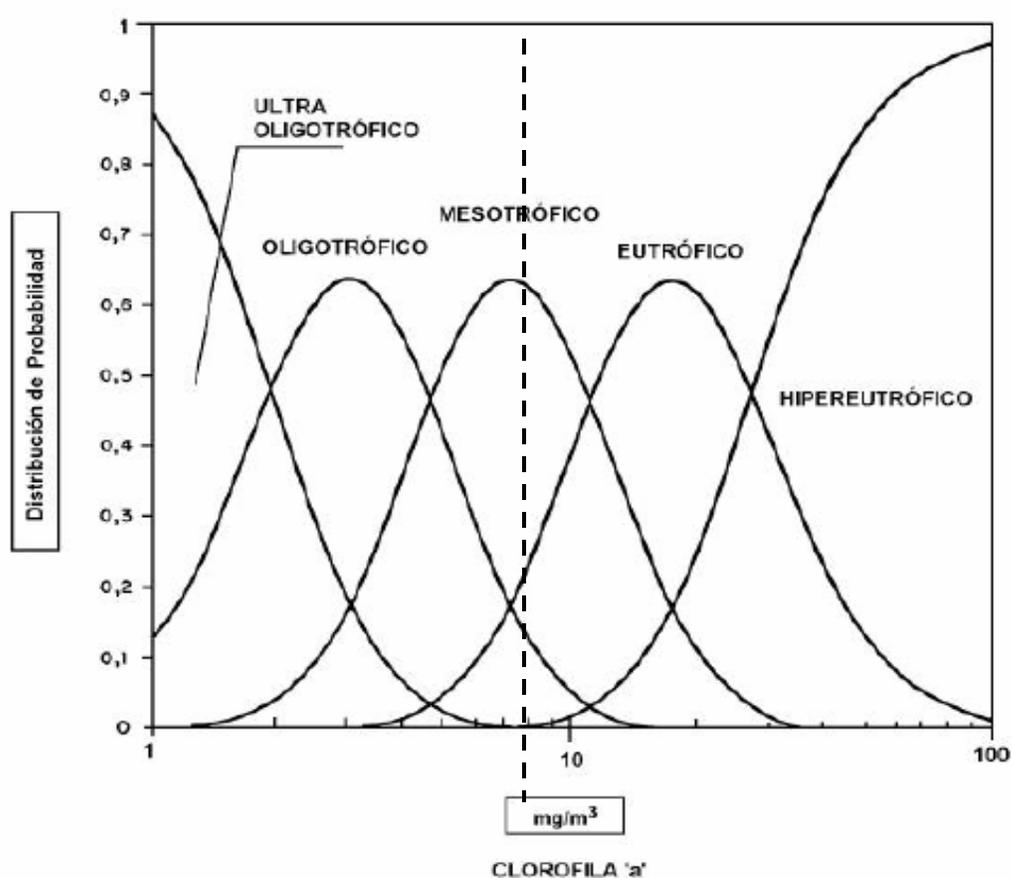


Figura 30. Distribución de probabilidad del nivel trófico del embalses Guajataca basado en clorofila *a*. Adaptado de Vollenweider y Kerekes (1981) para lagos calidos tropicales. La línea vertical punteada indica la concentración de clorofila en $\mu\text{g/l}$ para el embalse Guajataca.

Fitoplancton

Durante el presente estudio fueron registrados un total de 22 taxones pertenecientes a 20 géneros y 6 clases. Euglenophyta fue el grupo dominante a lo largo del año, contribuyendo con un 43.9% al total de la biomasa. Los dinoflagelados (Pirrophyta) fueron el segundo grupo en importancia con un 34.9% y el tercer grupo fue el de las Chlorophyta con un 10.71%. Los otros grupos de algas presentaron baja riqueza específica y bajo porcentaje de contribución al total del fitoplancton (tabla 6).

Tabla 6. Número de taxones y su porcentaje promedio de contribución a la densidad total de la comunidad fitoplanctónica en el embalse Guajataca. Marzo 2004- Febrero 2005.

GRUPO	Taxones	Porcentaje
Chlorophyta	9	10.71
Chlorophyceae		
Desmidiaceae		
Euglenophyta	3	43.88
Pyrrophyta	2	34.85
Cyanophyta	3	4.25
Bacillariophyta	4	2.95
Crysophyta	1	3.34
TOTAL	22	99.98%

La distribución temporal de fitoplancton total en la columna de agua para la E1 se muestra en la figura 31. La densidad promedio fue de 209 org/ml hasta el límite de la zona fótica (5 m). Producto de la similitud entre densidades totales alcanzadas se conformaron dos grupos de meses. Los meses de mayor densidad, y que corresponden a picos fitoplánctonicos fueron mayo (300 org/ml) y agosto (286 org/ml) a 1 metro de profundidad. El mes de marzo alcanzó la densidad mínima con 63 org/ml a 5 metros de profundidad.

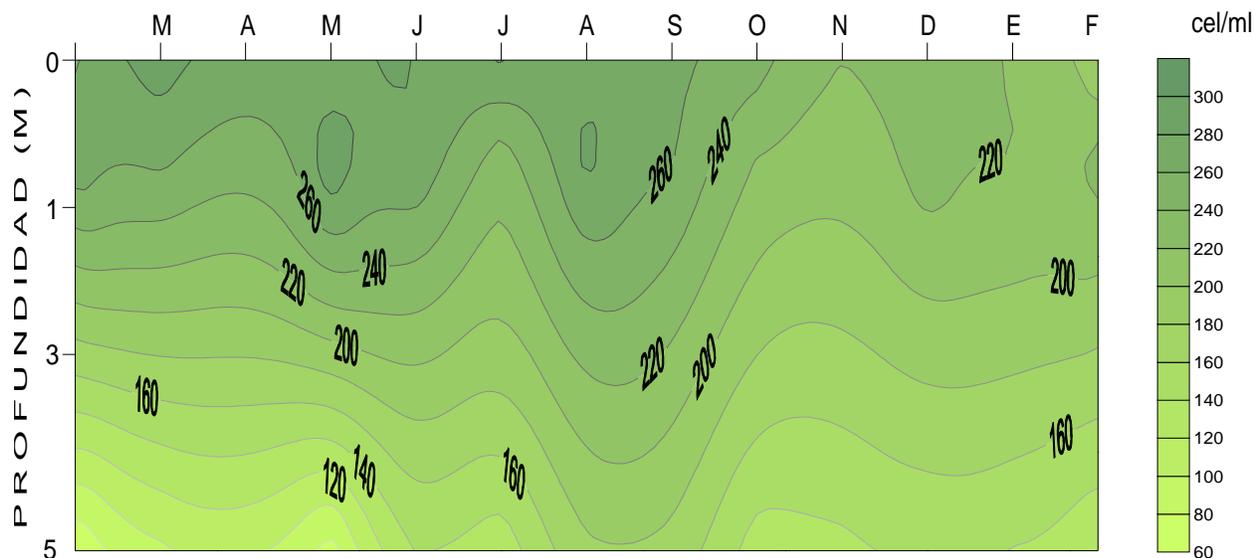


Figura 31. Distribución de la densidad total del fitoplancton (cel/ml) en función del tiempo y la profundidad para la estación 1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

La distribución temporal de fitoplancton total en la columna de agua para la E2 se muestra en la figura 32. La densidad promedio fue de 179 org/ml hasta el límite de la zona fótica (6 m). También se conformaron dos grupos de meses producto de la similitud entre densidades totales alcanzadas. Los meses de mayor densidad, y que corresponden a picos fitopláctonicos fueron junio (259 cel/ml) a nivel de superficie y julio (260 cel/ml) a 1 metro de profundidad. El mes de marzo alcanzó la densidad mínima con 76 cel/ml a 5 metros de profundidad. Una prueba de ANOVA indicó que hubo diferencias significativas entre las densidades de fitoplancton de ambas estaciones ($F=26.28$; $p<0,05$). En promedio, los mayores valores se encontraron en E1.

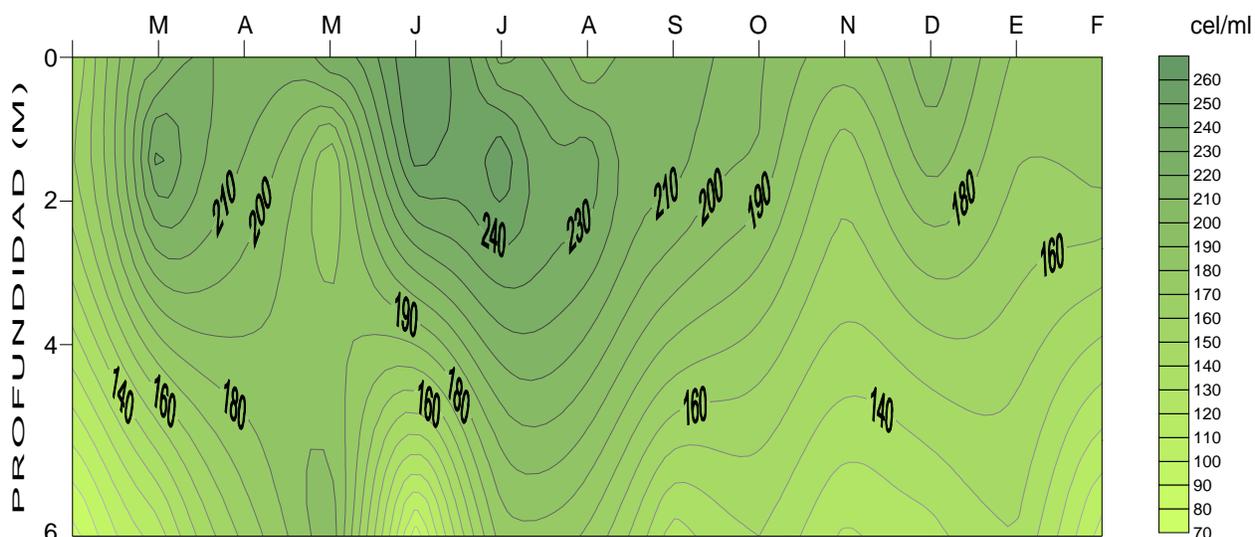


Figura 32. Distribución de la densidad total del fitoplancton (cel/ml) en función del tiempo y la profundidad para la estación 2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Chlorophyta

La figura 33 muestra la distribución de las algas verdes en la columna de agua y a través del tiempo, en E1 durante el período de estudio. El promedio de algas verdes en la columna de agua fue de 24.28 ± 8.82 cel/ml. La densidad promedio en la superficie fue de 30.92 ± 14.22 cel/ml, con mínima en marzo (10 cel/ml) y máxima en octubre (43 cel/ml) y en el límite de la zona fótica, a 5 metros de profundidad, fue 11.58 ± 9.4 cel/ml con valores mínimos en enero (2 cel/ml) y máximos en junio (37 cel/ml).

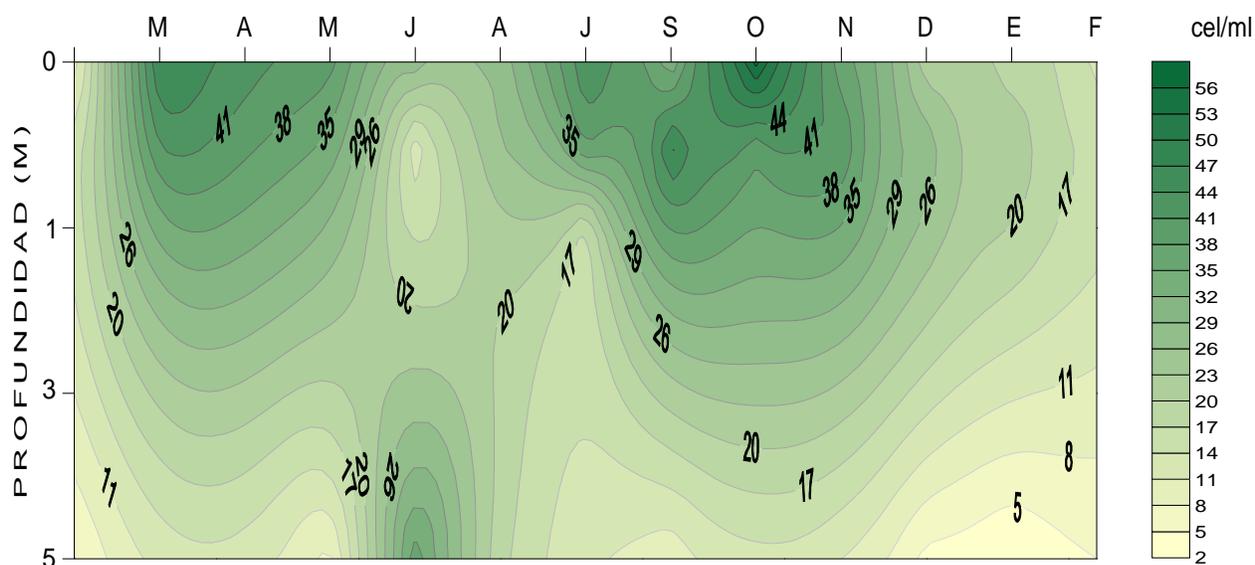


Figura 33. Distribución de la densidad de Chlorophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la densidad promedio de Chlorophyta en la zona fótica fue de 17.25 ± 6.83 cel/ml (figura 34). La variación promedio en la superficie fue de 22.17 ± 10.55 cel/ml, con valores mínimos en marzo (6 cel/ml) y máximos en mayo (43 cel/ml); mientras que en el límite de la zona fótica, a 6 metros de profundidad fue de 7.86 ± 5.06 , con mininos en noviembre (1 cel/ml) y máximos en julio (18 cel /ml) (figura 34). Hubo diferencia estadísticamente significativa en las densidades de Chlorophyta entre estaciones ($F=7.04$; $p < 0.05$).

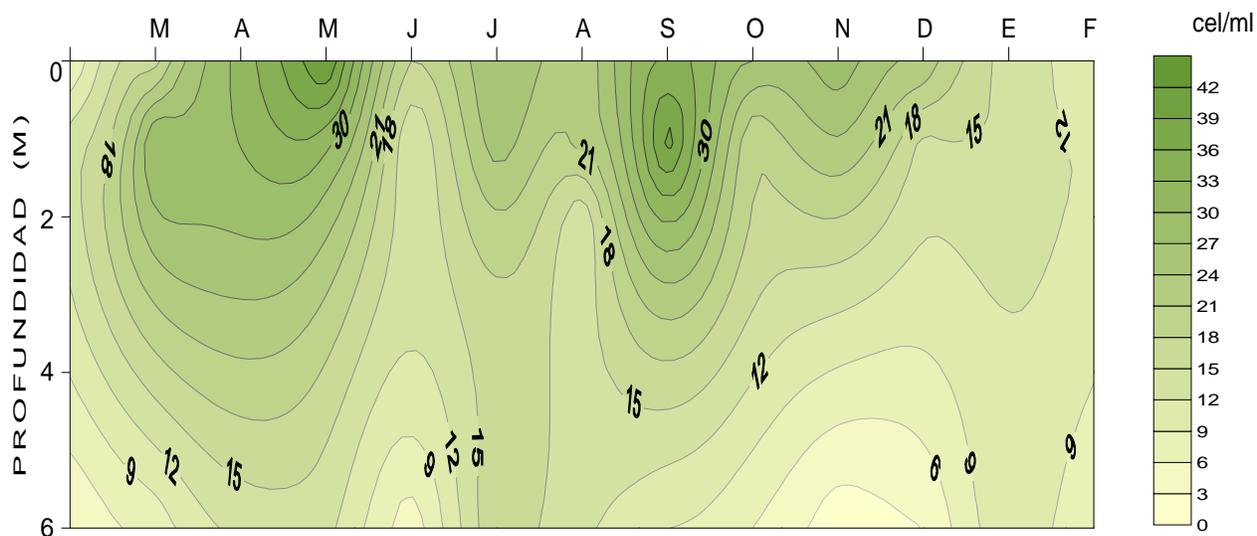


Figura 34. Distribución de la densidad de Chlorophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Euglenophyta

La figura 35 muestra la distribución de la división Euglenophyta en E1 durante el período de estudio. El promedio en la columna de agua fue de 90.25 ± 17.8 cel/ml. La concentración promedio en la superficie fue de 104 ± 23.18 cel/ml, con valores mínimos en febrero (73 cel/ml) y máximos en junio (140 cel/ml). El promedio a 5 metros de profundidad fue de 48 ± 27.22 cel/ml, con valores mínimos en marzo (9 cel/ml) y máximos en septiembre (96 cel/ml).

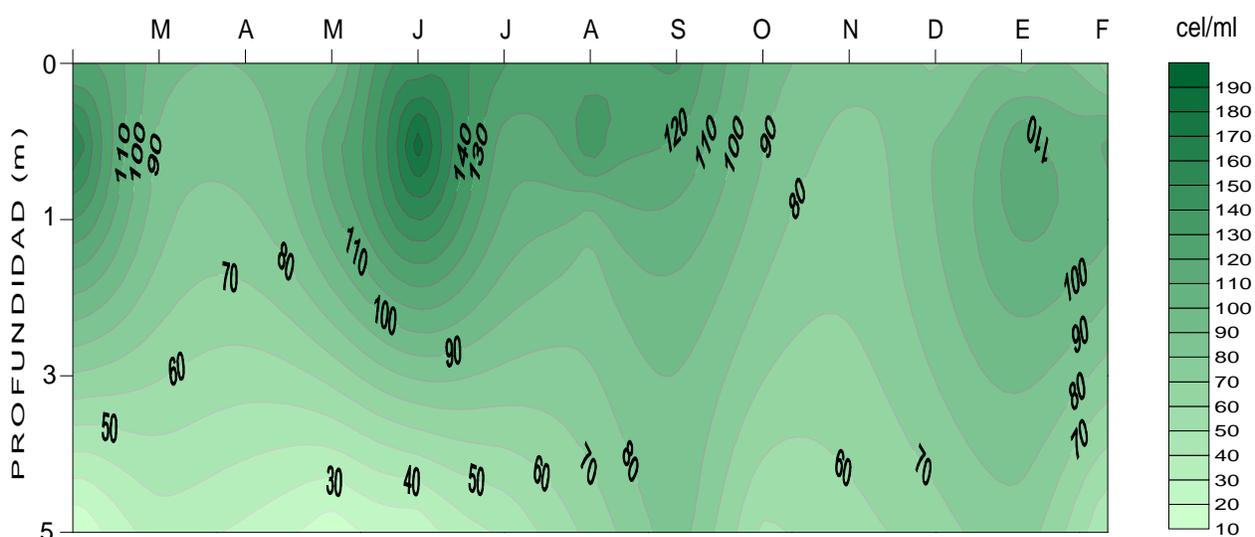


Figura 35. Distribución de la densidad de Euglenophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

La figura 36 muestra la distribución de los euglenofitos en E2 durante el período de estudio. El promedio en la columna de agua fue de 79.78 ± 17 cel/ml. La concentración promedio en la superficie fue de 96.2 ± 37.3 cel/ml, con valores mínimos en diciembre (67 cel/ml) y máximos en junio (208 cel/ml). El promedio a 5 metros de profundidad fue de 50.6 ± 15.49 cel/ml con valores mínimos en junio (26 cel/ml) y máximos en agosto (78 cel/ml). No se presentaron diferencias estadísticamente significativa en las densidades de Euglenophyta entre estaciones ($F=4.02$; $p>0.05$).

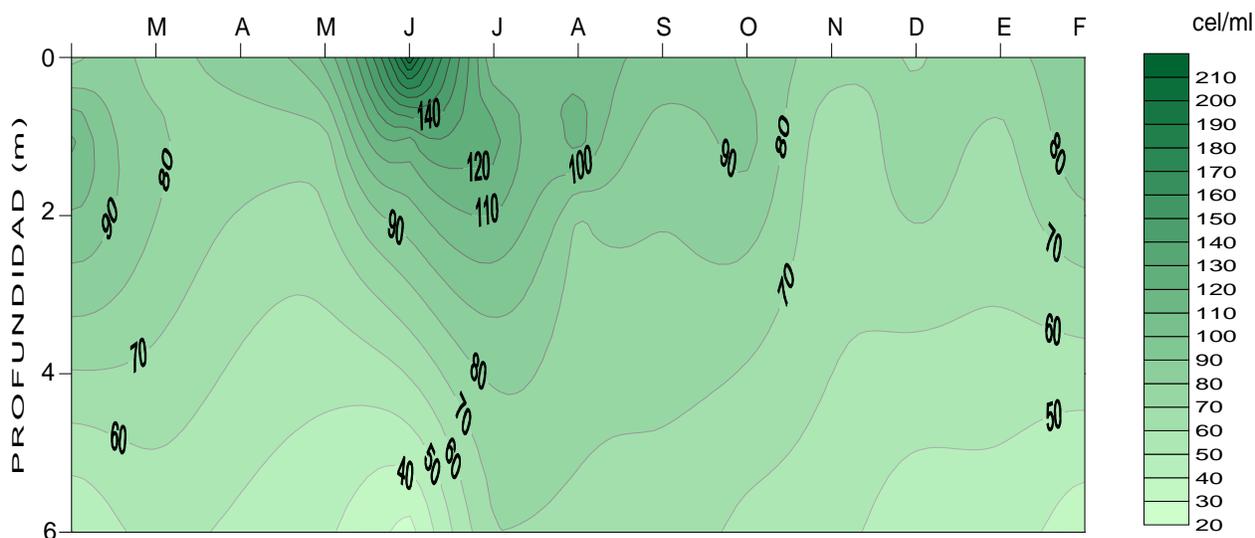


Figura 36. Distribución de la densidad de Euglenophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Pyrrophyta

La distribución de Pyrrophyta a través del tiempo y la profundidad se puede ver en la figura 37. El promedio de dinoflagelados en la columna de agua para E1 durante el periodo de estudio fue de 71.06 ± 11.21 cel/ml. La variación promedio superficial fue 65.5 ± 19.2 cel/ml, con mínimas en febrero (91cel/ml) y máximas en mayo (124 cel/ml) a 1 metro de profundidad. La variación promedio a 5 metros de profundidad fue de 47.1 ± 14.03 cel/ml, con mínimas en abril (23 cel/ml) y máximas en junio (69 cel/ml).

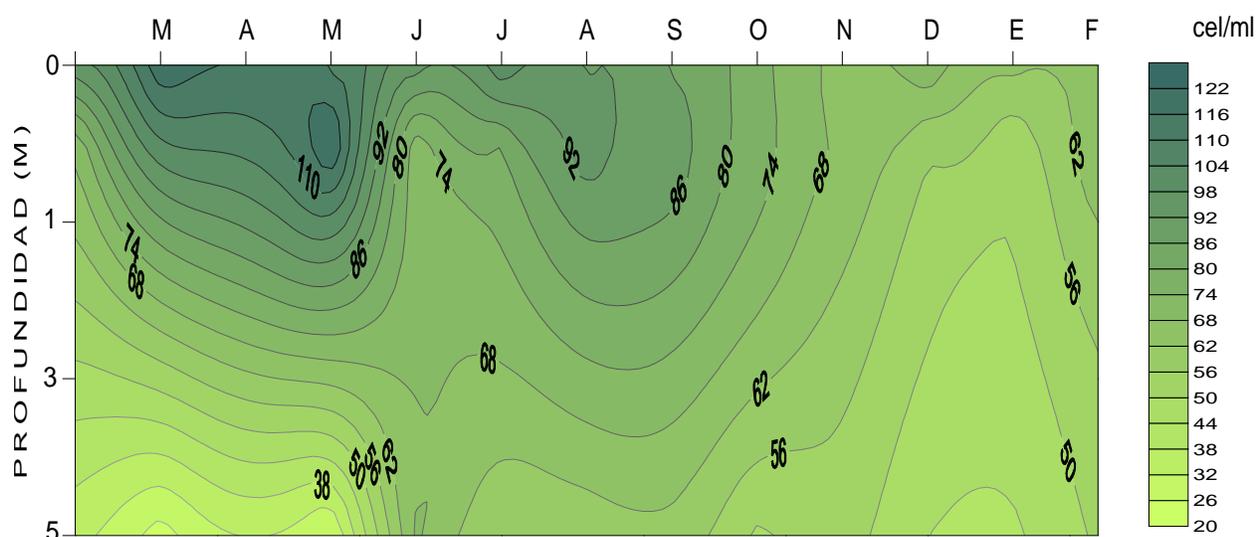


Figura 37. Distribución de la densidad de Pyrrophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

La figura 38 muestra la distribución de los dinoflagelados en E2 durante el período de estudio. El promedio en la columna de agua fue de 64 ± 13.25 cel/ml. La concentración promedio en la superficie fue de 66.5 ± 16.9 cel/ml, con valores mínimos en marzo (32 cel/ml) y máximos en junio (123 cel/ml) a 1 metro de profundidad. El promedio a 6 metros de profundidad fue de 53 ± 22.48 cel/ml, con valores mínimos en marzo (21 cel/ml) y máximos en mayo (99 cel/ml). Se presentaron diferencias estadísticamente significativas en las densidades de Pyrrophyta entre estaciones ($F=4.4$; < 0.05).

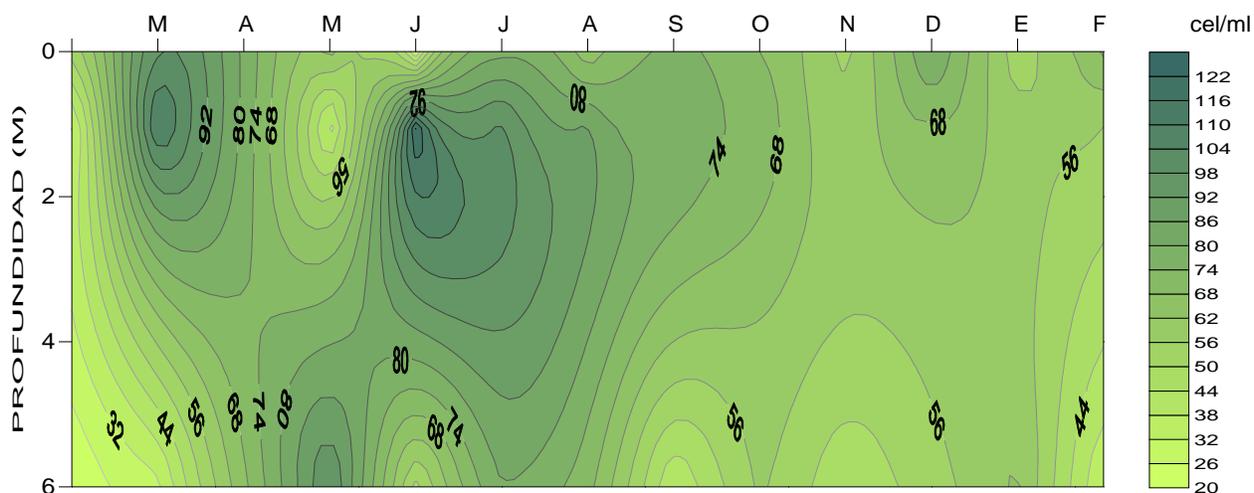


Figura 38. Distribución de la densidad de Pyrrophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Cyanobacteria

La figura 39 muestra la distribución de Cyanobacteria en la columna de agua y a través del tiempo en E1 durante el período de estudio. El promedio de algas verdes azules en la columna de agua fue de 8 ± 3.4 cel/ml. La densidad promedio en la superficie fue de 9.8 ± 4.43 cel/ml, sin presencia de organismos en febrero y con densidad máxima en abril (26 cel/ml) a 1 metro de profundidad. En el límite de la zona fótica, a 5 metros de profundidad, fue 5.3 ± 3.98 cel/ml con valores mínimos en octubre (1 cel/ml) y máximos en abril (16 cel/ml).

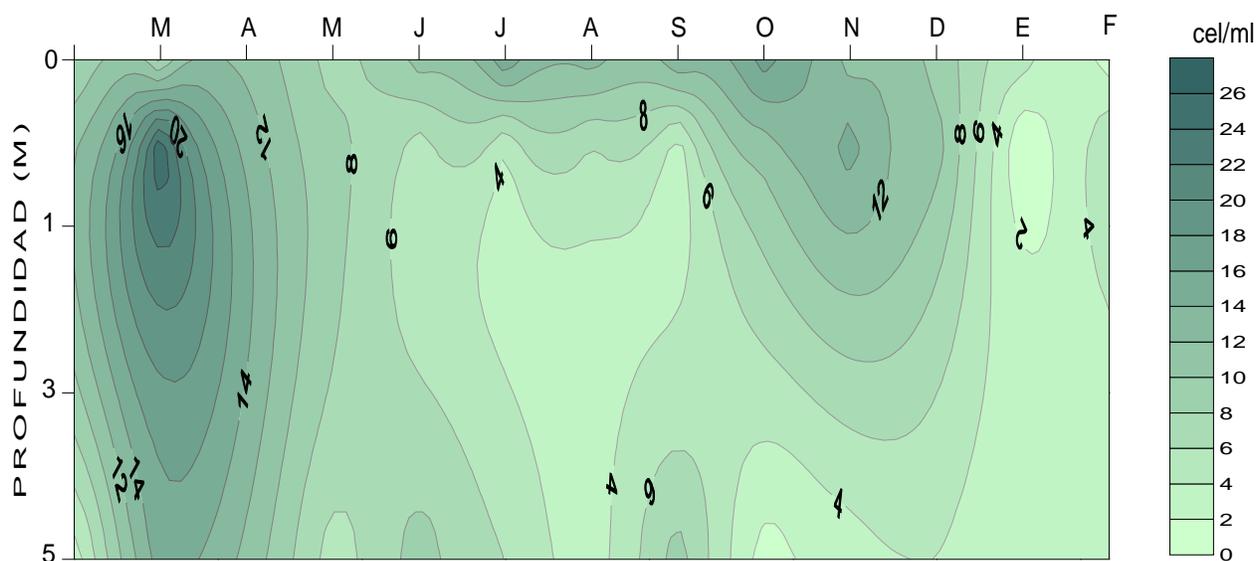


Figura 39. Distribución de la densidad de Cyanobacteria en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la densidad promedio de Cyanobacteria en la columna de agua fue de 8.42 ± 4.8 cel/ml. La variación promedio en la superficie fue de 8 ± 4.92 cel/ml, con mínima en junio (1 cel/ml) y máxima en diciembre (16 cel/ml) (figura 40), mientras que a 6 metros de profundidad la densidad promedio fue 8 ± 4.52 cel/ml con mínima en junio (1 cel/ml) y máxima en mayo (17 cel/ml). No se presentaron diferencias estadísticamente significativa en las densidades de cyanobacteria entre estaciones ($F=0.35$; $p>0.05$).

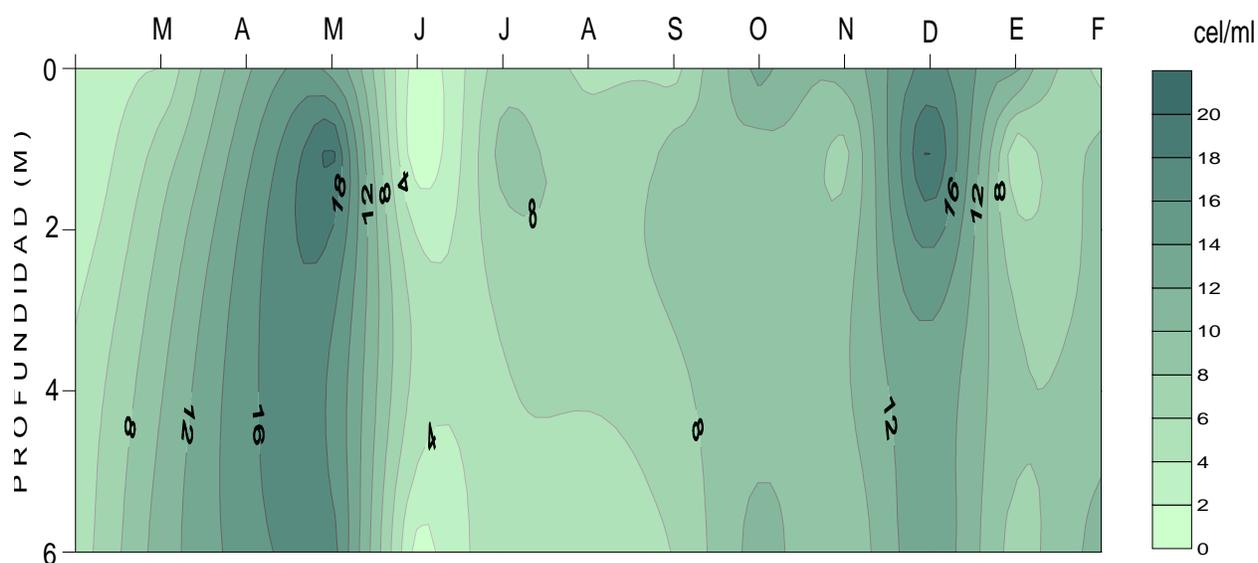


Figura 40. Distribución de la densidad de Cyanobacteria en función del tiempo y de la profundidad para E2, en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Bacillariophyta

La figura 41 muestra la distribución de *Bacillariophyta* en la columna de agua a través del tiempo en E1 durante el período de estudio. El promedio en la columna de agua fue de 5.8 ± 2.64 cel/ml. La densidad promedio en la superficie fue de 3.6 ± 1.88 cel/ml, sin presencia de organismos en octubre, y con máxima en mayo (13 cel/ml) a 1 metro de profundidad. En el límite de la zona fótica, a 5 metros de profundidad fue de 11.1 ± 2.64 cel/ml, con valores mínimos en junio (4 cel/ml) y máximos en mayo (21 cel/ml).

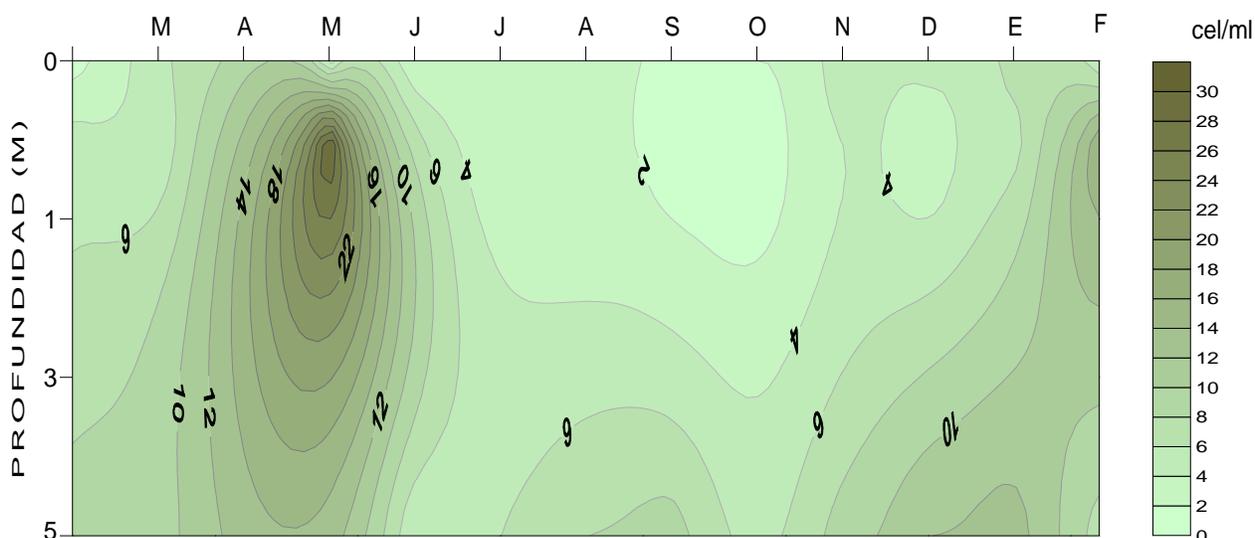


Figura 41. Distribución de la densidad de Bacillariophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la densidad promedio de Bacillariophyta en la columna de agua fue de 5.19 ± 3.18 cel/ml. La variación promedio en la superficie fue de 3.42 ± 2.35 cel/ml, sin presencia de organismos en marzo y con máxima en noviembre (7 cel/ml) (Figura 42), mientras que en el límite de la zona fótica a 6 metros de profundidad el promedio fue de 8.58 ± 6.67 cel/ml, sin organismos en julio, y con máxima en mayo (26 cel/ml). No se presentaron diferencias estadísticamente significativa en las densidades de Bacillariophyta entre estaciones ($F=0.7$; $p>0.05$).

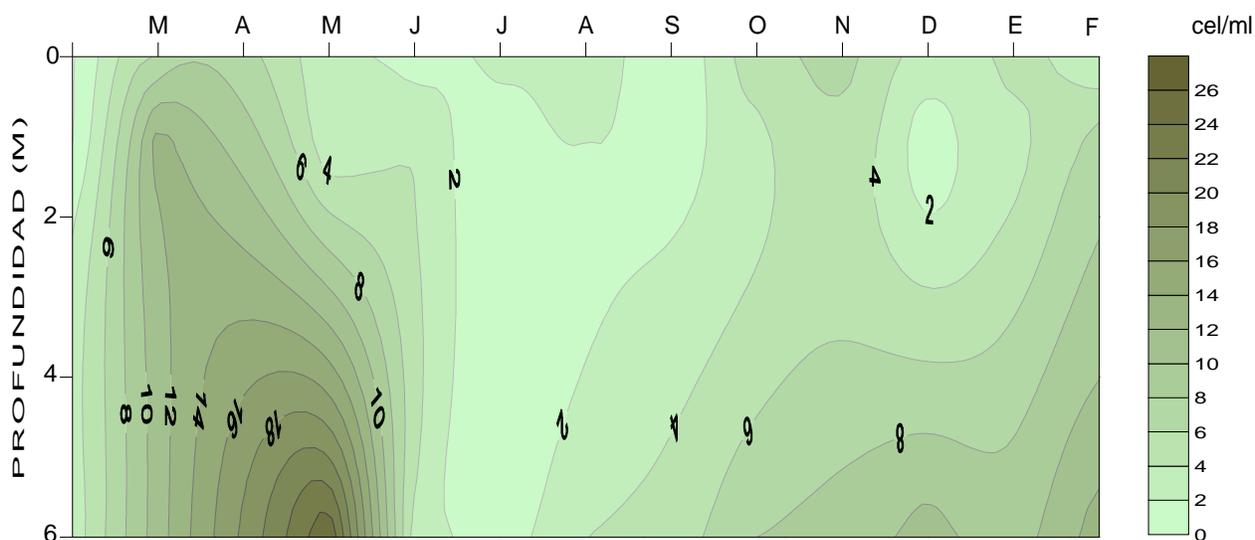


Figura 42. Distribución de la densidad de Bacillariophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Chrysophyta

La figura 43 muestra la distribución de Chrysophyta en la columna de agua y a través del tiempo en E1 durante el período de estudio. El promedio en la columna de agua fue de 8.89 ± 9.88 cel/ml. La densidad promedio en la superficie fue de 14.7 ± 14.85 cel/ml, sin presencia en agosto y septiembre, y con máxima en diciembre (41 cel/ml) y en el límite de la zona fótica, a 5 metros de profundidad, la densidad promedio fue 2.9 ± 3.55 cel/ml, sin presencia en julio, agosto y septiembre, y máximas densidades en diciembre (11 cel/ml).

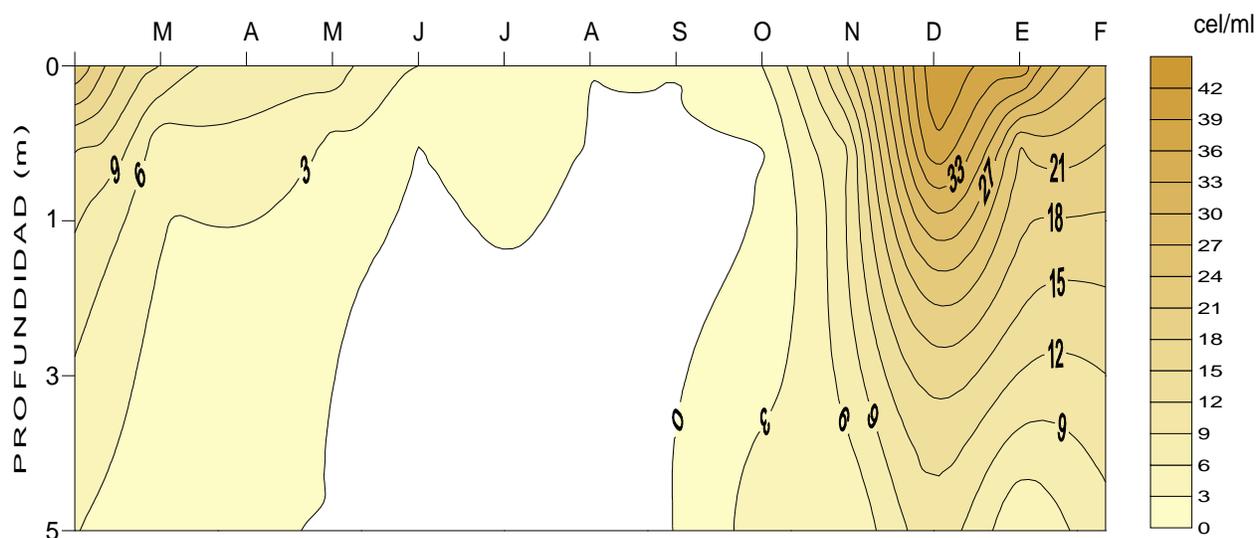


Figura 43. Distribución de la densidad de Chrysophyta en función del tiempo y de la profundidad para E1 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Para E2 la densidad promedio de Chrysophyta en la zona fótica fue de 17.25 ± 6.83 cel/ml. La variación promedio en la superficie fue de 4.06 ± 4.3 cel/ml, sin presencia de organismos en junio y julio, y con máximos en enero (17 cel/ml); mientras que en el límite de la zona fótica, a 6 metros de profundidad fue de 1.4 ± 1.62 , si presencia de organismos en julio, agosto y septiembre, y con máximos en marzo (5 cel /ml) (figura 44). Sí hubo diferencia estadísticamente significativa en las densidades de Chrysophyta entre estaciones ($F=4.5$ $p < 0.05$).

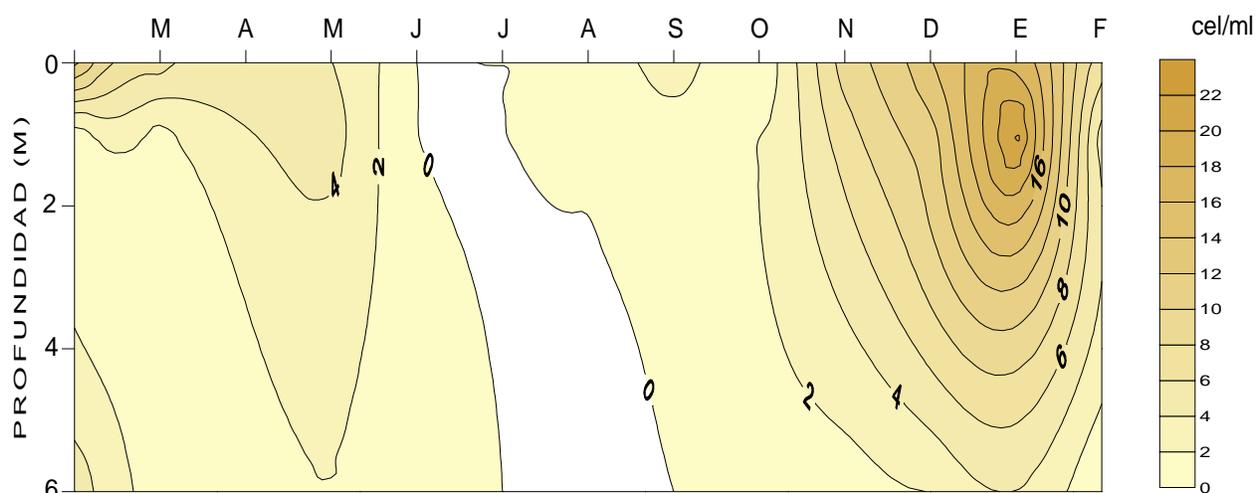


Figura 44. Distribución de la densidad de Chrysophyta en función del tiempo y de la profundidad para E2 en el embalse Guajataca, Puerto Rico.

Tabla 7. Comunidad de fitoplancton de la la estación 1 (cola del embalse) y la estación 2 (presa), promedios para las tres profundidades.

DIVISIÓN	Unidades	ESTACIÓN 1	ESTACIÓN 2
		Promedio \pm D.E	Promedio \pm D.E
Cyanophyta	cel/ml	8.1 \pm 3.4	8.42 \pm 4.8
Chlorophyta	cel/ml	24.28 \pm 8.82	17.25 \pm 6.83
Chrysophyta	cel/ml	8.89 \pm 9.88	4.06 \pm 4.3
Euglenophyta	cel/ml	90.25 \pm 17.8	79.78 \pm 17
Pirrophyta	cel/ml	71.06 \pm 11.21	64.05 \pm 13.25
Baccillariophyta	cel/ml	5.8 \pm 3.42	5.1 \pm 3.17

Tabla 8. Comunidad del fitopláncton a 0m, 1 m y 6 m de profundidad en la zona fótica basada en la media de las dos estaciones.

DIVISIÓN	Unidades	0 METROS	1 METRO	6 METROS
		Promedio \pm D.E	Promedio \pm D.E	Promedio \pm D.E
Cyanophyta	cel/ml	8.95 \pm 4.68	9 \pm 6.64	6.83 \pm 4.25
Chlorophyta	cel/ml	26.5 \pm 12.38	26 \pm 10.45	9.7 \pm 7.23
Chrysophyta	cel/ml	10 \pm 10.4	7 \pm 9.5	2 \pm 2.59
Euglenophyta	cel/ml	100 \pm 30.24	106 \pm 27.1	40 \pm 21.36
Pirrophyta	cel/ml	76 \pm 18.05	77 \pm 24.55	50 \pm 18.25
Baccillariophyta	cel/ml	3.5 \pm 2.12	3.83 \pm 3.5	9.83 \pm 5.73

DISCUSIÓN

Heterogeneidad espacial del embalse Guajataca

El Embalse Guajataca presenta una moderada heterogeneidad espacial dada por el canal principal (cauce del río) (figura 2). De la desembocadura del afluente (Río Guajataca) puede observarse un gradiente desde la zona fluvial, pasando por una zona de transición hasta llegar a otra de tipo más lacustre. Esta zonificación horizontal concuerda con lo planteado por Thorton et al. (1990) donde la cola del embalse se parece más al río y la cabeza (cerca de la presa) se asemeja a un lago, con una amplia zona de transición con un nivel promedio de 194 metros.

Cola o zona fluvial del embalse

En la cola se presenta la unión entre el afluente y las aguas del embalse, que en este caso corresponde a la estación 1 (figura 3). Es una zona alargada, estrecha correspondiente a una ampliación del canal del río. Se presenta un flujo más lento y su profundidad máxima para este estudio alcanzó los 10 metros. Las aguas del río tienden a estar algunos grados por debajo de las del embalse, así el afluente se hunde al entrar al embalse dejando en la superficie los materiales flotantes como troncos, hojas y basura. Los materiales más gruesos se depositan formando un cono de deyección, que puede quedar al descubierto durante el descenso de nivel en las áreas donde la profundidad no supera los 3 metros. Las aguas son más turbias limitando el ingreso de la luz y la productividad fitopláctónica; sin embargo, por comunicación de los pescadores deportivos, la actividad pesquera es más elevada basada en el aporte de materiales y organismos alóctonos.

Zona de transición

La zona de transición combina características de río y de lago. La presencia del río sigue siendo sensible en aguas intermedias y profundas, siguiendo la trayectoria horizontal, en la zona intermedia la cuenca del embalse se amplía hasta alcanzar un ancho máximo de 1580 metros y se profundiza hasta alcanzar 18 a 21 metros en la parte media. Muchos materiales en suspensión se depositan y la productividad planctónica se incrementa al aumentar la penetración de la luz.

Zona de la cabeza o lacustre

La cabeza del embalse presenta características lacustres de cuerpos lénticos, con una zona limnética amplia mucho más semejante a los lagos. La cubeta del embalse es amplia y profunda alcanzando los 26 metros de profundidad. El flujo es mucho menor respecto al volumen embalsado. Las aguas han descargado sus sedimentos y alcanzaron la mayor transparencia con un promedio de 2.21 metros (profundidad Secchi) por lo cual la penetración de la luz se incrementa y con ella la zona fótica o de producción fitoplanctónica que llegó a los 5.96 metros. Los aportes alóctonos son menos importantes. La estratificación es más definida, por lo anterior según Márquez y Guillot (2001) puede presentarse limitación de la producción por escasez de nutrientes, pues la tendencia es hacia las condiciones oligotróficas.

Parámetros fisicoquímicos

Transparencia Secchi

La extinción de la luz en ambientes acuáticos viene determinada por la cantidad de partículas en suspensión, los pigmentos disueltos y las propias características del agua (Verduin, 1982). Una de las características del embalse que más llama la atención es la poca transparencia de sus aguas que posiblemente se origina por el régimen hidráulico y mayormente por la densidad fitopláctonica. Las diferencias estadísticamente significativas entre los valores de transparencia de ambas estaciones demuestran que la penetración de la luz en la columna de agua está influenciada por el periodo de lluvias, que arrastran material en suspensión y compuestos disueltos que llegan al embalse, originando un aumento en la turbidez y resuspensión de los materiales arcillosos del fondo, en la cola del embalse donde desemboca el río Guajataca. Posteriormente por decantación rápida los materiales resuspendidos regresan al fondo. En la estación 2 la penetración de la luz es mayor debido a que el material en suspensión que arrastro el río disminuye hacia este punto donde las arenas y arcillas tienden a sedimentarse de forma rápida, acumulándose en el primer tercio del embalse, y sin llegar afectar la penetración de la luz en la segunda estación cerca de la presa.

Los menores valores de transparencia del agua se presentaron durante la época seca y fría para las dos estaciones, donde la baja transparencia podría estar vinculada a una combinación de factores que incluyen la biomasa de fitoplancton en suspensión y los altos niveles de detritos orgánicos e inorgánicos particulados y resuspendidos.

Los mayores valores de transparencia del agua se presentaron durante la época de lluvias (julio, agosto, septiembre). De acuerdo a González et. al (2004) la densidad de fitoplancton se diluye por el aumento de los caudales de los tributarios del embalse a causa de las altas precipitaciones, disminuyendo la turbiedad de las aguas, la cual es básicamente de origen biogénico (fitoplancton). Para las estaciones 1 y 2, durante los meses de junio a agosto (figura 4), el aumento de la temperatura pudo haber provocado una mayor velocidad de sedimentación (Riley et al 1949) que unido a la tranquilidad y estratificación del agua, llevó a una disminución de la concentración de material particulado y de detritos en las capas superficiales, permitiendo observar los mayores valores en las profundidades de observación del disco de Secchi. La observación del disco de Secchi señala transparencias que fluctuaron en estrecha relación con la densidad fitoplanctónica y detrítica en los distintos muestreos realizados para las dos estaciones de muestreo.

Los valores de transparencia medida con el disco de Secchi en la estación 1 son inferiores a los encontrados en la estación 2 en el embalse Guajataca. Los valores mínimos registrados durante el periodo de circulación (diciembre a marzo) corresponden posiblemente a las densidades de *Peridinium* unida a la presencia de una mayor cantidad de partículas en suspensión y detritos orgánico del fitoplancton. Los resultados de este estudio ponen en evidencia la importancia de los aportes alóctonos de material disuelto y particulado en la disminución de la profundidad del disco de Secchi en la entrada del embalse. De esta forma, existe una relación directa entre las entradas de agua al lago y la transparencia del agua.

Temperatura

Normalmente, los lagos tropicales presentan pequeñas diferencias verticales en cuanto a la temperatura; sin embargo, estas pequeñas diferencias son capaces de generar una estratificación térmica estable (Lewis, 1983). El tiempo incluido que va desde la segunda quincena de abril hasta la primera quincena de septiembre fue el periodo de calentamiento del embalse Guajataca durante el estudio. A partir de finales de agosto se inicia el descenso de la temperatura, disminución que en un principio afectó al epilimnion; al llegar a noviembre, el agua inició un proceso de circulación parcial que se propagó desde el epilimnion al metalimnion y capas superficiales del hipolimnion (figuras 5 y 6).

De marzo de 2004 a febrero de 2005 en la época seca y fría, posiblemente la capa de agua más fría y, por lo tanto más densa que las capas inferiores, fue descendiendo, hasta que en enero y febrero se observó una columna de agua más uniforme. A finales de marzo la temperatura de la atmósfera fue aumentando y las capas superficiales debieron ganar calor que se va transmitiendo a lo largo del perfil vertical. Posteriormente, en abril, debido a una mayor radiación solar, al aumento de la temperatura ambiental y al relativo poco viento típico de los meses cálidos, se presentó una temperatura relativamente alta y sostenida en la parte superficial del embalse que se mantiene hasta septiembre, permitiendo el establecimiento de una leve termoclina; estratificación que se mantuvo durante el verano.

Con relación al régimen térmico en la columna de agua, la temperatura promedio de 28.1 °C en la superficie y de 25.4 °C en el fondo a 26 metros de profundidad para la estación 2 de Guajataca (figura 6) fue suficiente para el establecimiento de una

estratificación térmica. Se ha subrayado que en los ecosistemas acuáticos con niveles superiores a los 20 °C, propio de los trópicos, no son necesarias grandes diferencias de temperatura entre las capas para que se produzca una estratificación de la columna de agua (Lewis, 1983, 1987; Talling y Lemoalle 1998). De acuerdo a Martínez. V (2005) la base física para este planteamiento es que la alteración de la densidad del agua varía en función de la temperatura pero de manera no uniforme; la densidad del agua decrece desproporcionadamente con los incrementos de temperatura. De esta manera, con la elevación de la temperatura del agua, las diferencias de densidad y viscosidad entre diferentes capas se tornan cada vez mayores. Por tales razones se plantea que un lago ubicado en latitudes tropicales, como lo es Guajacata, puede mantenerse estratificado la mayor parte del año (Lewis, 1996).

Otros factores que favorecen la estratificación térmica son la profundidad y el tiempo de residencia hidráulica. El embalse Guajacata presenta una cubeta amplia y profunda. Prácticamente la mitad del área total de embalse es lo suficientemente profundo ($Z_{max} \approx 21$ m) como para mantener una estratificación estable durante la mayor parte del año. Por lo tanto la diferencia de temperatura entre el epilimnion y el hipolimnion establece una barrera (metalimnion) que limita el transporte de nutrientes, oxígeno y de fitoplancton entre las capas superficiales y las más profundas. Con relación al tiempo de residencia hidráulica del embalse, calculado a partir de la relación escorrentía /volumen, se determinó que el lago renueva sus aguas 2.5 veces al año, equivalentes a 146 días que es el tiempo que el agua permanece embalsada. Este periodo de residencia hidráulica permite una mayor y larga estratificación durante el año, originando una mayor estabilidad del sistema térmico.

En el embalse Guajataca, los estratos superficiales presentaron una condición homogénea a comienzos de diciembre y a finales de marzo de la temporada de sequía, que es cuando el viento sopla con mayor velocidad en las zonas tropicales. Sin embargo, aparentemente la acción del viento no fue suficiente durante el período de estudio como para generar la circulación completa de las aguas, especialmente en la estación de sequía. Resultados similares plantea Maroto (1984) en estudios realizados en un embalse calido tropical de Venezuela, clasificándolo como cálido monomítico; es decir, con una mezcla completa de sus aguas una vez al año, la cual acontece durante la temporada de sequía (diciembre a febrero). De acuerdo al autor, la mezcla completa es ocasionada por el descenso de la temperatura más que por la acción del viento, ya que el embalse está rodeado de montañas.

La existencia de un periodo de circulación en invierno (durante el cual la temperatura del agua superficial se mantiene siempre superior a 4 °C), la variación térmica anual y la estratificación térmica estival, nos permite clasificar a este embalse como “monomítico cálido”, de acuerdo a Hutchinson (1957). Se observó un periodo de circulación corto y único durante la temporada seca y fría (diciembre a marzo) que coincide con el invierno hemisférico, y manteniendo un patrón de estratificación durante la temporada cálida y lluviosa (abril a septiembre). Según Wetzel (2001) este tipo de lagos se caracteriza porque: a) la temperatura no desciende por debajo de 4 °C, b) la circulación ocurre durante el invierno y c) la estratificación ocurre en los meses cálidos. Patrones similares de mezcla y estratificación han sido registrados para otros lagos en México con características semejantes en cuanto a latitud, altitud y profundidad; como el lago Zirahuén (Martínez. V, 2005), y Zacatal y la Escondida (Torres et al., 1996).

Oxígeno disuelto

La distribución horizontal del oxígeno disuelto en el embalse describe un gradiente de altas concentraciones en dirección al río Guajataca y una reducción en concentraciones de oxígeno en dirección a la presa (figuras 7 y 8). Los valores más altos de oxígeno disuelto encontrados en la estación 1 se deben a la entrada del río Guajataca, donde llegan aguas más frías y oxigenadas.

La dinámica del oxígeno disuelto estuvo vinculada con las variaciones de la temperatura; esta relación fue más evidente en el epilimnio del embalse durante la estratificación (figs. 7 y 8). En las aguas superficiales de Guajataca se observó una concentración alta de oxígeno disuelto por encima de 7 mg/l, durante todo el año, para las dos estaciones sin presentarse diferencias estadísticas significativas entre ellas. En el epilimnion, las isopleas que encierran las concentraciones mayores a 8 mg/l en verano señalan también los valores de saturación de oxígeno debido, principalmente a la actividad del fitoplancton.

Durante el periodo de estudio la distribución vertical del oxígeno disuelto en Guajataca se caracterizó por curvas de tipo clinógrado. En el embalse este patrón fue consistente prácticamente durante la mayor parte del año, sin embargo se observó una desviación significativa de la distribución clinograda durante los meses secos y fríos de diciembre a marzo, correspondientes al periodo de mezcla, donde se observa una curva con un leve perfil ortogrado desde el epilimnion hasta las primeras capas del hipolimnion. Según Martínez, V (2005), en muchos lagos tropicales oligotróficos y

mesotróficos, el perfil de oxígeno es más variable que el térmico durante la estratificación, incluidos aquellos periodos con una termoclina ligera.

En el estudio realizado por Candelas y Candelas (1964), en las aguas del lago las máximas concentraciones de oxígeno registrado fue de 6.68 mg/l en la superficie y de 1.3 mg/l a 6 metros de profundidad, mientras que en este estudio el promedio para la superficie fue mayor con valores cercanos a los 7.6 mg/l, y en el límite de la zona fótica, a 6 metros de profundidad para la salida del embalse, fue de 4.59 mg/l. Teniendo en cuenta estos valores podemos suponer que el aumento del oxígeno disuelto en la actualidad se debe a la mayor productividad fotosintética por parte de fitoplancton, que aporta un mayor porcentaje de oxígeno comparado con el reportado en la década de los cincuenta, cuando el embalse tenía sólo 24 años de construido y las condiciones fisicoquímicas y fitoplánctónicas del lago posiblemente presentaban características oligotróficas.

Una fuente de oxígeno importante en el embalse Guajataca son las algas del fitoplancton. Durante los procesos fotosintéticos de estas comunidades se liberan apreciables cantidades de O_2 ; por esta razón, se detectan máximos metalimnéticos en la concentración de O_2 , durante la estratificación estival, a las profundidades coincidentes con los máximos de clorofila.

La interfase aire-agua y la fotosíntesis son dos fuentes de oxígeno que actúan en las capas más superficiales del lago, y sólo en el período de mezcla invernal afectan también a zonas un poco más profundas, debido al hundimiento del agua del epilímnion y a la elevación del agua del hipolímnion. Por tanto, el poco oxígeno almacenado en los estratos medios, durante el período de mezcla, será la única reserva disponible para la

oxidación de la materia orgánica que desciende desde los estratos productivos superiores a lo largo del año. La concentración de O_2 disminuye progresivamente en la columna de agua hasta valores inferiores a 1 mg O_2/l , valores alcanzados a partir de los 12 metros de profundidad prácticamente durante todo el ciclo anual. La disminución progresiva de O_2 en el lago a lo largo del año está determinado por: a) el consumo de O_2 por parte del fitoplancton y zooplancton, b) la oxidación química de la materia orgánica, y c) la respiración bacteriana (sobretudo en la interface sedimento-agua).

Los fondos anóxicos dominan al embalse Guajataca. El bajo promedio de las concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua para las dos estaciones, se debe a una reducción acelerada del oxígeno a partir de los 8 metros de profundidad que forman un hipolimnion totalmente anóxico en las capas más profundas. Los mínimos niveles de oxígeno detectados en el hipolimnion de la estación 1 durante la época seca y fría son causados por las aguas frías, oxigenadas y densas provenientes del río Guajataca.

Si se toma como referencia la profundidad máxima del embalse (26 m), es posible que no se alcance una circulación completa con relación al oxígeno disuelto. Esto es debido posiblemente a que la temperatura alta del hipolimnion en los lagos y embalses tropicales y subtropicales pudiera proporcionar condiciones optimas para una importante tasa de descomposición y un alto consumo de oxígeno.

En ausencia de oxígeno disuelto la materia orgánica sufre oxidación por bacterias heterotróficas creando un potencial de oxido-reducción. Este potencial de

oxido reducción (REDOX) induce un déficit de oxígeno disuelto en el sistema. La descarga de materia orgánica al embalse durante los periodos de lluvia, en adición a la sedimentación continua de detritos y organismos planctónicos, sostienen una demanda bioquímica de oxígeno disuelto suficientemente alta como para mantener condiciones anaeróbicas y reductoras en el hipolimnion. De acuerdo a García y Tilly (1981) estas condiciones reductoras son, en general, desfavorables para el desarrollo del fitoplancton u otros organismos aerobios, por lo tanto la renovación de oxígeno disuelto por organismos fotosintéticos no es significativa a estas profundidades.

La desoxigenación de la masa de agua del embalse se asocia a la descomposición de la vegetación terrestre que fue inundada. Por otro lado, como consecuencia de una mineralización de esta materia orgánica inundada, ocurre una gran liberación de nutrientes disueltos que contribuyen a la eutroficación de las aguas, con el consiguiente crecimiento del fitoplancton y macrófitas acuáticas. Según Candanedo (1983) en este punto la situación parece convertirse en un ciclo, en el cual los nutrientes inorgánicos promueven la formación de biomasa vegetal y la muerte y descomposición de ésta vuelve a proveer substrato orgánico para la remineralización de los nutrientes, que son asimilados nuevamente por el fitoplancton y las macrófitas. El aumento en la tasa de desoxigenación y su extensión en tiempo y profundidad depende de algunos factores, entre los que se incluyen: la cantidad y naturaleza de la vegetación sumergida, el perfil térmico del embalse, los niveles de nutrientes de los suelos inundados, la tasa de renovación del agua del embalse y el flujo y la calidad del agua de los tributarios (Goldman, 1973). Es importante señalar que la anoxia

hipolimnética es reconocida tradicionalmente como un síntoma de eutrofia (Wetzel, 1979; Margalef, 1983).

pH

En general, el pH del agua se mantuvo ligeramente alcalino en las dos estaciones sin presentar diferencias estadísticas entre ellas. El descenso progresivo del pH, ésta variación se produce, principalmente como consecuencia de los cambios en el contenido de anhídrido carbónico por la remoción fotosintética de este compuesto en las capas superiores. Es conocido que el proceso de fotosíntesis aumenta el consumo de CO_2 , lo cual se manifiesta en las elevaciones temporales de pH (Lampert y Sommer, 1997), lo cual a su vez se observa en las capas superiores de este embalse. Mientras tanto, en las capas inferiores, después de los 5 metros de profundidad a medida que se aumenta la profundidad el agua se vuelve más ácida como consecuencia de los productos resultantes de la actividad bacteriana. Los valores altos de pH encontrados en Guajataca pueden atribuirse a dos factores importantes: uno geológico producto del alto contenido de carbonatos y bicarbonatos que tienen como origen el sustrato cárstico, y otro biológico debido a la actividad diurna de masas de fitoplancton muy abundantes.

En la columna de agua se observa una disminución gradual del pH con la profundidad. Durante el periodo de estratificación fueron más bajos los valores en el hipolimnion que en los meses de circulación. Esto es debido a la producción de ácido carbónico a partir de dióxido de carbono disuelto en el agua, conjuntamente con ácidos

orgánicos provenientes de la degradación incompleta de material orgánico por actividad microbiana (Wetzel, 2001).

Conductividad

Según de Hoyos (1996) en un estudio realizado en el lago Sanabria (España) la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$ a 25°C) es una buena indicación de la mineralización del agua, y tiene una correlación muy alta con elementos como el Ca, Mg, CO_3 , Cl^- , Na, K y SO_4 (de Hoyos, 1996). Las rocas ígneas y sedimentarias que constituyen el substrato de la cuenca hidrográfica del embalse Guajataca (fundamentalmente calcita y esquelita) se caracterizan por presentar un grado de meteorización medio; por tanto, la solubilidad de estas rocas determina el contenido en sólidos totales disueltos (TSD) y la conductividad eléctrica del agua del lago. La conductividad del agua de los cuerpos lénticos aumenta al incrementarse la concentración de las sales ionizadas. En adición se sabe que la temperatura aumenta la velocidad iónica, incrementando la conductividad en un 2% por cada grado Celsius (Candenedo y D'croz, 1983).

En E1 y en E2 (figuras 11 y 12) se presentaron patrones similares de variación de la conductividad a lo largo de la columna de agua, sin diferencias estadísticas entre estaciones. Normalmente, los mayores valores de conductividad se registraron en los estratos profundos del embalse especialmente en la época de lluvias. En el embalse Guajataca la conductividad aumentó con la profundidad y durante la estratificación este proceso fue más evidente. La conductividad del agua es moderada ($<300 \mu\text{S}/\text{cm}$) y presentó una distribución en profundidad acorde con la de la temperatura. Se observa

una quimioclina coincidente con la termoclina que separa aguas de diferente grado de mineralización (<250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el epilimnion y >300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el hipolimnion) durante el periodo de estratificación térmica. Esto está probablemente asociado a la dilución en el epilimnion causada por las lluvias y por la mineralización de sales en el fondo. Los promedios en la columna de agua, mínimos en septiembre y máximos en enero, aparentemente están relacionados con las temporadas de lluvias (promueve la dilución de electrolitos en la columna) y secas (promueve la concentración de electrolitos en la columna).

Los valores de conductividad presentaron unas oscilaciones cíclicas principalmente en la salida del embalse (figura 12). La conductividad disminuyó en verano, posiblemente debido al consumo de las sales por las algas del fitoplancton y las macrofitas litorales. Sin embargo, en el periodo de noviembre a marzo, las sales tienden a acumularse el fondo de los lagos debido al vertido del contenido somático de las células muertas del fitoplancton (de Hoyos, 1996). También en el período de circulación invernal se rompe parcialmente la estratificación, homogeneizando la columna de agua en la zona fótica.

El contenido mineral aumenta con el tiempo de residencia del agua en un embalse (Hoyos, 1996), el cual fue estimado en 146 días para este estudio en Guajataca, siendo el tercer embalse con mayor tiempo de retención hidráulica de Puerto Rico. Los cationes que contribuyen principalmente al incremento de la salinidad, durante el periodo de escasa renovación del agua, son el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , estando relacionado su aumento con la disolución de los minerales del substrato.

Turbidez y Sólidos Suspendidos

La turbidez aumenta hacia el fondo en el perfil batimétrico (figuras 23 y 24). En los momentos que siguen a la mezcla vertical en abril y mayo, iniciada por el aporte masivo de agua por el fondo, aumenta la turbiedad de la masa acuosa de capas más altas, debido al arrastre, no solo de los organismos que se van sedimentando hacia el fondo, sino de las arcillas removidas de los sedimentos. Los valores disminuyen en el agua superficial durante la época plena de estratificación.

En la distribución horizontal, la turbiedad fue más elevada en la cola del embalse presentado valores máximos de 4.63 NTU, mientras que decrece hacia la presa con un promedio de 2.27 NTU (figuras 23 y 24) presentando diferencias significativas entre estaciones. Los registros obtenidos en la estación de cola, tanto para la transparencia como para la turbidez, se encuentran condicionados por los aportes de carácter inorgánico que, a causa de las lluvias previas a la realización del muestreo, arrastraba el tributario principal. Durante el trayecto del agua hacia la presa, y con el tiempo de residencia hidráulica, la decantación de material parental y aloctono es más evidente llegando a concentraciones mínimas en este punto. Este fenómeno hace las aguas más claras, efecto reflejado en la transparencia del disco de Secchi. El patrón que sigue la turbidez refleja el proceso de sedimentación de las partículas en suspensión que se produce a lo largo del embalse, pero que no condiciona la productividad del mismo, debido a que la transparencia del agua cerca de la presa está influenciada directamente con material en suspensión de origen biogénico, compuesto por plancton.

Los sólidos suspendidos son bajos y tienen la misma tendencia que la turbidez, a pesar de no estar correlacionados estadísticamente. La concentración de sólidos en suspensión fue más elevada en el tributario o cola del embalse y menor en la presa (figuras 21 y 22). En el perfil de la zona fótica la concentración de sólidos disueltos es directamente proporcional a la profundidad debido a las características del sustrato, formado por arcillas y limos que se sedimentan fácilmente y cuando se origina turbulencia o mezcla los (SS) tiende a subir a capas superiores. El aporte de sólidos suspendidos es básicamente de origen geológico, a partir de la fragmentación del sustrato de la cuenca que arrastra sedimentos de tipo arenas y arcillas hacia el embalse. Por su parte, los sólidos suspendidos no parecieron relacionarse directamente con las variaciones de turbidez (tabla 4) lo que corrobora la influencia de material biológico en la transparencia del agua.

Nitrógeno total

La distribución horizontal del nitrógeno total en el embalse describe una tendencia similar a la, de el oxígeno disuelto y conductividad mostrando un gradiente de mayores concentraciones en dirección al río Guajataca en la cola del embalse, y una reducción en concentraciones de nitrógeno total en dirección a la presa, presentando diferencias significativas entre estaciones. Estas diferencias se deben a los aportes de nutrientes que deposita el río y que ha transportado a través de la cuenca, así como a la escorrentía de los suelos circundantes al embalse en época de lluvias. Resultados similares encontraron Martínez. G, et al. (2005) en la concentración de nutrimentos entre las diferentes secciones dentro de los cuerpos de agua.

Específicamente la sección de la entrada del embalse reflejó una mayor concentración de nutrimentos que la zona central y la zona cerca de la represa de las reservas.

La concentración de nitrógeno total presentó pocas variaciones a lo largo del ciclo estudiado, con una evolución cíclica y una leve estratificación en el verano. La distribución del nitrógeno total a lo largo del ciclo anual fue la siguiente: durante el periodo de circulación el perfil vertical es relativamente uniforme en la columna de agua de la zona fótica. En el verano y durante los meses de la estratificación, se localizaron clinas a un metro de profundidad a finales de mayo y principios de junio y otro pico importante sucedió a finales de agosto y principios de septiembre (Figuras 13 y 14). A partir de octubre las concentraciones de nitrógeno total tendieron nuevamente a homogenizarse en la columna de agua sin presentar cambios significativos que coinciden con las mayores concentraciones registradas durante los 12 meses del año. Un proceso similar fue observado por González et al. (2004) en un embalse tropical en Venezuela, en donde las concentraciones de N total en el embalse presentaron pocas variaciones durante el período de estudio. Sus mayores concentraciones se registraron en los estratos profundos mientras prevalecieron las condiciones de anoxia, principalmente debido al aporte de amonio. Esta tendencia ha sido observada en otros embalses oligotróficos de Venezuela con estratos profundos anóxicos, como Lagartijo y Taguaza (González et al.2004).

La distribución vertical de nitrógeno total se caracterizó por dos tipos de sucesos relacionados mayormente a los patrones de deslave y circulación del lago. Durante el periodo de la estratificación las concentraciones de nitrógeno total reflejaron valores relativamente altos distribuidos en un gradiente acentuado de concentraciones

mayores a la profundidad de un metro para (E1) y de dos metros para (E2). Las condiciones hidrológicas en este término se caracterizaron por un flujo riverino alto y de altas temperaturas.

Los valores máximos de NTK corresponden a los meses de verano, durante la estratificación que coinciden con los periodos de máximas lluvias, la escorrentía y el lavado de suelos y formaciones vegetales adyacentes al embalse. Esto probablemente permite incrementar los aportes de nitrógeno al cuerpo de agua. Según Horne and Goldman (1994), los nitratos, la forma más común de nitrógeno inorgánico en lagos y ríos, presentan sus mayores concentraciones en los estratos superficiales de los embalses durante la estación de lluvias. Es decir, las precipitaciones constituyen un aporte importante de nitratos a los cuerpos de agua. A finales de la estratificación se dieron bajos valores de nitrógeno, el cual alcanzó su mínima expresión en los últimos meses de año, debido probablemente a la lenta liberación de los mismos, provenientes de la descomposición de la materia orgánica, y por haber sido consumidos por el fitoplancton.

El TKN se incrementó progresivamente a partir de la mezcla (mixis). La fijación de nitrógeno por parte de las cianobacterias en el embalse Guajataca posiblemente tiene menor importancia ya que este grupo de algas es poco abundante; solo es probable que ocurra con importancia en la época seca en las capas superficiales cuando la concentración de nitrógeno en el lago es mínima, cuando aparece *Anabaena* sp, que persiste hasta el momento de la mezcla vertical.

El nitrógeno pudiera actuar como nutriente limitante en el embalse Guajataca para algunos grupos de algas, como las clorofíceas. Estas algas presentaron una biomasa importante en los meses de verano (mayo-septiembre) cuando hubo un incremento considerable en la concentración de nitrógeno a consecuencia del aporte de lluvias.

Según Garcia y Tilly (1983), el efecto combinado de la reducción bioquímica de las formas oxidadas en el hipolimnion y de asimilación por organismos autotróficos en la capa superficial induce una distribución dicótoma de las formas disueltas y oxidadas de nitrógeno en la columna de agua. Este tipo de distribución ha sido reportado por Hutchinson (1957) para lagos altamente productivos en los cuales predominan condiciones anóxicas en el hipolimnion similares a las observadas en Guajataca. Con la restauración del patrón clinogrado, el material orgánico se acumula en el hipolimnion y las concentraciones de nitrato se reducen a la forma de amoníaco.

Teniendo en cuenta las características anóxicas del hipolimnion en el embalse, suponemos que se pueden encontrar altas concentraciones de amonio indicando conversión de nitrógeno orgánico a NH_4^+ como resultado de la remineralización de la materia orgánica por bacterias heterotróficas bajo condiciones de anoxia, proceso conocido como amonificación (Lampert y Sommer 1997).

Fósforo total

El fósforo presentó el mismo comportamiento que el nitrógeno con relación a la distribución horizontal, indicando un gradiente de mayores concentraciones en la estación 1 (cola del embalse) y una reducción considerable en concentraciones de

fósforo total en la estación 2 (presa), indicando diferencias significativas entre estaciones (Tabla 2). Estas diferencias se deben a los aportes de nutrientes que deposita el río y ha transportado a través de la cuenca, así como a la escorrentía de los suelos circundantes al embalse en época de lluvias. Las mayores concentraciones de fósforo total en el verano coinciden al periodo inmediato y subsiguiente de altas descargas riverinas. Junto con el establecimiento de la condición estratificada en los meses de verano (abril-septiembre) se presentaron las concentraciones más altas de este parámetro, producto de las altas descargas de agua que arrastro el río, transportando material parental de la cuenca con altas concentraciones de fósforo posiblemente de origen geológico y antropogénico de actividades ganaderas, agrícolas y domésticas de la zona. Las proporciones de fósforo total se redujeron escalonadamente desde la estratificación hasta el periodo de mezcla donde se observó una distribución más uniforme en la columna de agua.

Las variaciones a lo largo del ciclo anual dependen de varios factores. El incremento en la superficie se puede atribuir a los aportes de nutrientes por parte del río Guajataca en época de altas precipitaciones. En otras ocasiones, cuando la precipitación es intensa el aporte es doble, por la superficie y por el fondo, cuando la entrada de agua remueve los sedimentos cargados de fósforo como ocurrió en el mes de agosto en donde el agua de la zona fótica se enriqueció con fosfatos solubles y se alcanzó la mayor concentración en todo el periodo estudiado. Este momento también coincide con las mayores concentraciones de nitrógeno y clorofila, y precedió a la proliferación algal de verano. A consecuencia de la actividad metabólica de las algas el fósforo cuya concentración en agosto era de 0.109 mg/l, decreció hasta alcanzar una

concentración de 0.038 mg/l en octubre. Tan rápido consumo, que es común en los momentos de proliferación algal es debido a que los organismos fotosintetizadores acumulan ortofosfatos en su interior y, según Maccreth (1953), se reparte a las nuevas generaciones algales, continuando de esta forma la multiplicación de las algas después de haberse alcanzado los valores mínimos de fósforo en el agua en los meses fríos de diciembre a marzo (Planas, 1973).

Las concentraciones de fósforo total en el epilimnion son bajas y muy similares en la columna de agua de la zona fótica. Esto sugiere que el fósforo podría estar suficientemente disponible solo de manera eventual y apunta a que, al existir valores de variaciones de fósforo epilimnético bajos, gran parte de éste pudiera quedar inmovilizado en el sedimento. El fósforo es extremadamente reactivo e interactúa con varios cationes y forma, especialmente bajo condiciones de oxidación, compuestos relativamente insolubles que se precipitan hacia los sedimentos. Los lagos y embalses con un perfil clinogrado de oxígeno generalmente muestran un marcado incremento de fósforo soluble hacia las capas más profundas del hipolimnion. El metabolismo bacteriano de la materia orgánica es el mecanismo primario por el cual el fósforo orgánico es convertido a PO_4 en los sedimentos y es responsable de la creación de condiciones reductoras para la liberación del ión (Martínez.V, 2005).

Las reacciones químicas en las capas superiores del sedimento y en la interfase agua-sedimento, determinan que aquél actúe como trampa o como fuente de fósforo. La movilización del fósforo es uno de los factores más importantes en el proceso de eutroficación (Psenner y Gunatilaka, 1988; Sas, 1989; Hupfer, 1995), la que depende en gran parte de la concentración del mismo en la columna de agua. Altas

concentraciones de P total en los sedimentos de un lago pueden tener su origen en altas aportaciones externas, causando así un proceso de eutroficación. Sin embargo, este proceso de eutroficación puede ser también una consecuencia de la escasa capacidad de retención del fósforo por parte del sedimento como hierrofosfato.

Más del 95 % del fósforo está asociado a fase particulada, como los microorganismos (Wetzel, 2001). En estos casos el fósforo es más eficientemente retenido en los sedimentos debido a concentraciones bajas de sulfatos, pues el fósforo sólo se libera en sedimentos anaeróbicos, especialmente si hay un mecanismo activo de sulfuro de hidrógeno por reducción bacteriana de sulfatos. Esto posiblemente ocurre en Guajataca pues este control sobre la movilización del fósforo se acomoda a las condiciones anóxicas que imperan en el fondo del embalse (Roden y Edmonds, 1997).

En el momento de la mezcla vertical hay una disminución en la concentración del fósforo total y una distribución más uniforme en la columna de agua. A pesar de que la mezcla favorece la recuperación de los elementos nutritivos, dicho empobrecimiento en Guajataca es justificado por ser un lago parcialmente meromítico, impidiendo el intercambio de nutrientes entre el epilimnion y el hipolimnion.

Fósforo disponible

De todos los compuestos de fósforo presentes en los lagos, el fitoplancton sólo puede usar el fosfato soluble para su crecimiento (Reynolds, 1984; Wetzel, 2001). Sus bajas concentraciones en el embalse Guajataca parecieran ser limitantes, por lo tanto, para la comunidad planctónica de este cuerpo. El fósforo disponible indicó el mismo

comportamiento que el fósforo total y la gran mayoría de parámetros fisicoquímicos estudiados, presentándose las mayores concentraciones en (E1), con relación a (E2), de esta manera se puede aseverar que la mayoría de aportes de nutrientes se debe al arrastre de sedimentos y nutrientes que deposita el río Guajataca al embalse.

En los valores observados se aprecia una acentuada estacionalidad, con máximos en la época de la mezcla invernal tal como observó De Hoyos (1996). Durante la mezcla invernal se produce un retorno, desde las zonas más profundas, de la mayor parte del P vertido al medio por la descomposición de la materia orgánica particulada. Este afloramiento de fosfatos en las zonas más iluminadas aportará nutrientes para el crecimiento primaveral de las algas. Posteriormente, la muerte y sedimentación del fitoplancton aportará P, de nuevo, a las zonas más profundas del hipolimnion.

Es de suponer que el aporte de nutrientes por las lluvias y/o por arrastre desde los terrenos circundantes (con áreas cultivadas) fue importante para el desarrollo del fitoplancton. La limitación del fósforo fue marcada, a diferencia del nitrógeno que en el mes de junio fue limitante en la estación 1 (figuras 25 y 26).

Las fracciones de fósforo en el medio acuático se suelen dividir de forma arbitraria en disueltos y particulados, según su habilidad para atravesar un filtro. La forma asequible directamente para los productores primarios es la de ortofosfatos, que se encuentran en la fracción inorgánica disuelta. Sus niveles en el medio suelen ser muy bajos porque son rápidamente capturados por los compartimentos celulares, aunque también existe una liberación apreciable desde las células al medio. Se

consideran, como formas biodisponibles los ortofosfatos, que pueden ser equivalentes de cierta forma con el fósforo reactivo soluble (PRS).

Clorofila a

La clorofila del fitoplancton permite captar la energía de la luz y sintetizar la materia orgánica a partir del CO₂ disuelto en el agua. La determinación de la concentración de clorofila constituye, por tanto, un parámetro limnológico importante para estimar la biomasa activa del fitoplancton en un instante temporal determinado. Las concentraciones epilimnéticas de clorofila-a variaron entre 43.98 µg/l en mayo, a 1 metro de profundidad, y 1.68 µg/l en marzo a nivel de superficie. Las menores correspondieron a los periodos de menor densidad de algas, y los momentos de mayor concentración de clorofila coincidieron con un mayor número de algas.

La distribución horizontal de las concentraciones de clorofila a en el embalse describe una tendencia similar a la oxígeno disuelto, nitrógeno total, fósforo total y conductividad mostrando un gradiente de mayores concentraciones en dirección al río Guajataca en la cola del embalse, y una reducción en concentraciones de clorofila-a en dirección a la presa, indicando diferencias significativas entre estaciones.

Con relación a la distribución anual, la máxima concentración de clorofila-a en la zona eufótica para la estación 1 ocurrió en el periodo de estratificación térmica, coincidiendo con el valor máximo de nutrientes registrados en esta temporada. Según Edmondson (1957), el enriquecimiento con nutrientes provoca un rápido aumento en las concentraciones de clorofila 'a'. Los valores mínimos de clorofila en la capa eufótica se presentaron en la etapa de circulación, en la época seca y fría, cuando ya había

finalizado la proliferación algal quedando entonces en el agua concentraciones mínimas de nutrientes. En términos generales las concentraciones mínimas se midieron en el periodo que siguieron a las proliferaciones algales (noviembre a marzo). En este periodo, cuando la intensidad lumínica es menor, se dan los valores más bajos, y probablemente la luz, al igual que los nutrientes cumpla un papel determinante en la productividad del embalse.

La distribución vertical en la columna de agua para la zona fótica es similar a la distribución del oxígeno disuelto, nitrógeno total y fósforo total, mostrando picos altos al inicio de la estratificación a finales de mayo y durante la estratificación plena en agosto. Durante el periodo de estratificación, que coincide con la máxima transparencia e intensidad lumínica y con el aumento de temperatura, en la zona eufótica encontramos puntos máximos a un (1) metro de profundidad durante la estratificación en abril y agosto. Las mínimas concentraciones se presentan a 5 y 6 metros de profundidad para E1 y E2, respectivamente.

Durante los meses secos y fríos (noviembre a marzo) la concentración de clorofila *a* se reduce considerablemente, esto es debido a la baja de la penetración de la luz que disminuye el grosor de la zona a pocos metros de profundidad. Por lo tanto, la intensidad luminosa parece jugar el papel más importante en la regulación de la actividad de los organismos fotosintetizadores, aun cuando la concentración de nitrógeno influye directamente sobre la síntesis de clorofila.

La abundancia del fitoplancton y las concentraciones de clorofila *a* fueron bajas con promedios de 209 cel/ml y $7.8 \mu\text{g.L}^{-1}$, respectivamente. Tales valores fueron inferiores a lo registrado en otros ambientes lénticos de América, en clima tropical y

subtropical (Schmidt, 1970; Huszar, 1989; Giani y Leonardo, 1988; García de Emiliani, 1993; González, 1998, 2000; Zalocar de Domitrovic, 1992).

Nutriente limitante: relación NT/PT

Según Salas y Martino (2001) el concepto de nutriente limitante se basa en la premisa que, dada una determinada estequiometría celular de las plantas acuáticas, el nutriente que controlará la máxima cantidad de biomasa vegetal es aquél que primero se consume o que alcanza un mínimo antes que los otros nutrientes relativos a tal estequiometría. La relación nitrógeno total (N_T) a fósforo total (P_T) propuesta por Vollenweider (1983) para el fitoplancton y utilizada por el proyecto fue de 9:1. De esta forma, los lagos y/o embalses con relaciones de nitrógeno a fósforo superiores a un valor de 9 fueron considerados potencialmente limitados por fósforo, mientras que aquéllos cuya razón era inferior a 9 eran limitados por nitrógeno.

Para el embalse Guajataca la relación N:P para la estación 1 fue de 12.1 lo cual indica el nutriente potencialmente limitante es el fósforo. Para la estación 2 la relación N/P fue de 14.5 lo cual también indica que el nutriente potencialmente limitante es el fósforo.

La relación nitrógeno total–fósforo total ($N_T:P_T$) puede servir de indicativo de cuál es el elemento limitante para el desarrollo del fitoplancton (Salas y Martino, 2001). En el embalse, los valores de esta relación casi siempre fueron mayores a 9, lo que indicaría que el fósforo fue el principal elemento limitante para el desarrollo del fitoplancton.

Este comportamiento refleja que, si bien tanto el N como el P pueden escasear en alguna época del año, el PD, al agotarse por completo sobre todo en el período de diciembre a marzo, se convierte en un elemento mucho más limitante que el N. Bajo tales circunstancias, es de esperar que el crecimiento fitoplanctónico resulte disminuido por la escasez de nutrientes, condición que se observa en las figuras 31 y 32 donde muestran que las densidades fitoplanctónicas menores son de diciembre a marzo. Esto significa que el P es el reductor del desarrollo algal ya que a pesar de su moderada concentración, gran parte parece no estar disponible para las algas. Es necesario anotar que no importa la concentración externa de un nutriente, sino el flujo del mismo hacia el organismo (Ramírez y Alcaráz, 2002).

Sin embargo, se debe señalar que tanto el nitrógeno y el fósforo estuvieron presentes en bajas concentraciones en ciertas épocas del año, por lo que se puede afirmar que el fitoplancton del embalse Guajataca estuvo limitado por ambos nutrientes. Martínez et al. (2005) encontraron que tanto el nitrógeno como el fósforo limitan el desarrollo de la flora acuática en las reservas de agua de Puerto Rico. Este hallazgo contrasta con observaciones realizadas en la zona templada que identifica predominantemente al fósforo como el factor limitante para el desarrollo de la biomasa acuática.

Estado trófico

Se ha desarrollado el concepto del estado trófico para referirse a la tasa de materia orgánica que es proporcionada por o para un lago y/o embalse (Carlson, 1984), y evalúa el grado de eutroficación del mismo.

De acuerdo con numerosos autores, entre los que se encuentran Welch (1952), Carlson (1977) y Margalef (1983), existe un grupo de características morfométricas (profundidad, margen de la cuenca, transparencia etc.), químicas (oxígeno hipolimnético y nutrientes) y biológicas (productividad, biomasa, especies indicadoras, etc.) que definen los principales estados tróficos.

La baja turbiedad abiótica en el embalse nos permitió la posibilidad de aplicar índices o escalas de estado trófico, como el de Carlson (1977), en el que el primer supuesto considera que la claridad del agua debe estar en función únicamente de la abundancia algal (turbiedad biótica), condición que se cumple en el embalse Guajataca. Debido a lo anterior, la utilización de éste y otros índices condujo a una estimación de la condición trófica. El embalse presentó características mesotróficas según las concentraciones de clorofila (fitoplancton) y fósforo total. La profundidad del disco de Secchi indicó mesotrofia ya que en este caso la influencia por la turbidez inorgánica (aportes de sólidos desde la cola y el tributario) es mínima. La composición del fitoplanctón es típica de aguas oligo-mesotróficas.

El diagnóstico del estado trófico se refuerza con los resultados de los factores limnológicos, como son: el agotamiento de oxígeno disuelto hipolimnético y el pH con tendencia a la acidez en el fondo, sobre todo en la estratificación. Ambos son indicadores de la acumulación de materia orgánica en descomposición en el fondo y, por ende, del proceso de eutroficación.

Por otra parte, se cuenta con un estudio de calidad de agua de los embalses de Puerto Rico realizado por Martínez. G, et al. (2005), cuyos resultados se utilizaron para evaluar el estado trófico a partir del índice de Carlson. De acuerdo a éste concepto los siguientes embalses se clasificaron en la categoría mesotrófica: Guajataca, Cariate, Cerrillo, Garzas, Matrullas y Patillas.

También la naturaleza calcárea de la cuenca tiene influencia en el estado trófico del embalse, ya que, de acuerdo con Foy (1985), los carbonatos forman complejos altamente insolubles con el fósforo, con lo cual se logra la inactivación de este nutriente en los sedimentos. Por lo tanto, las aguas duras del embalse pudieran disminuir la carga interna de fósforo.

Fitoplancton

La comunidad fitoplanctónica del embalse Guajataca se caracteriza por presentar una baja densidad y variabilidad del fitoplancton; esto significa que no tiene una alta diversidad de especies, pero sí la abundancia relativamente alta de unas pocas. El embalse Guajataca se caracterizó por la frecuente dominancia numérica de Euglenophyta y Pyrrophyta. No obstante, en algunas oportunidades, otros grupos de algas como las Chlorophytas se encontraron en concentraciones importantes.

El análisis cuali y cuantitativo de la distribución vertical del fitoplancton a través del tiempo (figuras 31 y 32) indicó la existencia de dos estratos bien diferenciados que se caracterizaron por su diferente composición y abundancia. La capa superior (0 y 1 m), generalmente con mayor densidad numérica de algas que las encontradas en el límite de la zona fótica a 5 m de profundidad. Sin embargo en determinados periodos

(diciembre a marzo) algunos grupos de algas tienden a distribuirse de forma más uniforme en la columna de agua. En otros muestreos se observó que las concentraciones de ciertos grupos de algas (Bacillariophyta y Pyrrophyta) a 5 m superaron a las observadas en las capas superiores posiblemente a consecuencia de una mayor sedimentación ocurrida después de grandes desarrollos algales en el epilimnion.

En general, los valores totalizados por las especies más frecuentes (Euglenophyta y Pyrrophyta) resultaron semejantes para las muestras superficiales (0 y 1m). Para el total de fitoplancton se destacó un periodo de valores mínimos con relación a la abundancia que se pueden relacionar con cambios físicos y químicos del agua.

Se ha señalado que generalmente existe una relación directa entre los grandes eventos físicos y los cambios en la abundancia y biomasa del fitoplancton (Kalf y Knoechel, 1978). De manera consecuente, en Guajataca las fluctuaciones de abundancia fitoplanctónica coinciden con el periodo de circulación y el periodo de estratificación. Las densidades de fitoplancton tienen mayor variación en los meses fríos y secos, cuando se presenta una leve mezcla en la columna de agua. Según Martínez. V, (2005) este fenómeno es de esperarse debido a la relación entre organismos y factores ambientales puede ser bastante aleatoria que durante la relativa estabilidad de la columna durante la estratificación plena.

Los mayores valores relativos se presentan durante el periodo de verano o de estratificación. El comportamiento corresponde a lo esperable por la relativa estabilidad del embalse pero los valores resultan algo bajos para su nivel de

mineralización. No hay mayores diferencias entre estaciones ni entre épocas, lo que sugiere homogeneidad en la masa de agua por mezcla horizontal.

De acuerdo con Reynolds (1988), la comunidad fitoplanctónica se estructura, básicamente, en relación a la disponibilidad de luz y nutrientes. En ambientes con disponibilidad de nutrientes, predominan organismos oportunistas, de rápido crecimiento y reproducción, y alta relación superficie/volumen, denominadas C-estrategas. En ambientes con limitación de nutrientes, predominan los organismos tolerantes a este *stress* o S-estrategas. En ambientes con cambios frecuentes en la calidad de luz debido generalmente a turbulencias, predominan los R-estrategas.

La presencia cuantitativamente dominante de los fitoflagelados nanoplanctónicos en el Embalse Guajataca, principalmente durante los meses calidos y lluviosos, podría explicarse por sus características de organismos oportunistas, alta relación superficie/volumen, alta eficiencia para la incorporación de nutrientes y alta tasa de reproducción (Reynolds, 1984, 1988; Sandgren, 1988). Ello los coloca en el grupo de las estrategias C.

El mayor desarrollo de las cianobacterias coincidió con el período de concentración indetectable de fósforo y con la mayor disponibilidad de nitrógeno y silicatos. Ello pondría en evidencia su eficiencia para crecer en ambientes limitados por nutrientes, especialmente el fósforo (Reynolds, 1988, 1997), representando a los S estrategias.

La dominancia de formas filamentosas sobre las coloniales, indicaron las condiciones turbulentas del sistema, característica que también fue encontrada por Hino (1979), para el embalse de Lobo (Broa). *Microcystis aeruginosa*, la especie

colonial más abundante, alcanzó mayor desarrollo en la zona lacustre, mostrando las características más eutróficas de esta estación.

Dinámica espacial del fitoplancton

Las características morfológicas e hidrológicas del embalse son determinantes en las diferencias en la composición y abundancia de esta comunidad. La evidencia estadística demuestra un gradiente espacial en los valores de abundancia que decrece desde la cola del embalse hacia la presa. En tal sentido, el caudal aportado por el río Guajataca con alta carga de nutrientes, conjuntamente con la escasa profundidad del sistema, determina condiciones favorables para la mezcla de la columna de agua. A su vez, la mezcla interfiere con la permanencia de las floraciones de crysophytas y favorece el desarrollo de organismos tolerantes a la turbulencia, como especies de alta tasa de crecimiento y requerimientos nutricionales, como *Euglena* y *Peridinium*. A diferencia de lo encontrado en la cola del embalse; en la salida del mismo cerca de la presa, la hidrodinámica del sistema presenta condiciones más favorables para el desarrollo y permanencia de floraciones de chlorophytas y cyanobacterias. Estas estarían dadas por la poca movilidad del agua y su mayor profundidad.

Dinámica temporal del fitoplancton

Además de la heterogeneidad espacial ha sido observada una variación temporal dada por la estacionalidad de la temperatura y del ciclo hidrológico. Respecto a las variaciones hidrológicas del embalse se evidencian diferencias interanuales de precipitación y nivel del embalse. La mayoría de las especies con densidades

significativas en el fitoplancton mostraron un patrón unimodal en la abundancia, coincidiendo el máximo de número de organismos con el periodo de lluvias y el mínimo con el periodo seco y frío. Los picos de mayor abundancia en el verano se dieron principalmente en mayo y agosto. En los meses fríos y secos (octubre, noviembre y diciembre) se noto un descenso de la abundancia de la mayoría de los organismos fitoplanctónicos. Para el periodo de lluvias, el río Guajataca arrastra hacia el embalse nutrientes procedentes de la cuenca de captación, así como de los procesos de descomposición, incrementando el contenido de estos en las aguas de la reserva.

El aumento de la abundancia del fitoplancton durante la estratificación, debe estar vinculado de igual modo al aumento y disponibilidad de nutrientes, como consecuencia de las altas descargas de sedimentos y nutriente por parte del río Guajataca, y también por el proceso de reciclado a partir de la mineralización de la materia orgánica.

Los mecanismos responsables de la estacionalidad fitoplánctonica han sido descritos por Lewis (1978) y Talling (1986). En los lagos y embalses tropicales las variables ambientales que regulan los cambios temporales del fitoplancton no es la temperatura, pues este factor es considerado relativamente constante a lo largo del año. Otras variables que asumen mayor relevancia son: la precipitación, el viento, las fluctuaciones del nivel del agua y los procesos de estratificación y circulación, los cuales provocan patrones de variación en la disponibilidad de nutrimentos y de la luz subacuática viéndose reflejado en el ciclo fitoplanctónico (Esteves, 1988).

Margalef (1983) plantea que toda sucesión fitoplanctónica inicia con un periodo de mezcla progresiva en la medida que la columna de agua se estabiliza esto puede producir una, dos o varias sucesiones durante el año.

La variación del fitoplancton en el embalse Guajataca presenta un patrón que coincide temporalmente con la mayor abundancia principalmente de pyrophyta (*Peridinium*) y euglenophyta en mayo y septiembre que coinciden con el inicio y el final de la estratificación térmica. La población se sostiene durante el verano a nivel de superficie y a 1 metro de profundidad, y se ve disminuida a 5 metros. Este aumento de la abundancia en el verano debe estar vinculado de igual modo al aumento y disponibilidad de nutrientes por aporte del río y reciclados a partir de la mineralización de la materia orgánica.

Pyrophytas

Después de las euglenofitas, el grupo más importante en abundancia fue el de los dinoflagelados. En Guajataca esta división está representada por dos géneros *Peridinium* y *Peridiniopsis*. El primero aporta un 68.34% de la biomasa total de este grupo mientras que el segundo 31.6%.

En general, se asocia la presencia de dinoflagelados con aguas estratificadas y bajas en nutrientes, donde su capacidad de resistir la sedimentación y aprovechar y acumular niveles mínimos de nutrientes son adaptaciones de gran valor competitivo (Marquez y Guillot, 2001). Sin embargo alguna de sus especies, parece hacer una excepción a esta regla y tiende a comportarse mas como oportunista que prolifera hasta alcanzar grandes densidades (como se reporta para Guajataca en este estudio)

luego de las posibles mezclas que fertilizan el agua en los meses de abril y mayo. Además su capacidad de retener fosfatos le permite hacer reservas para sobrevivir cuando la fertilización ha pasado. Estos atributos quizá expliquen su persistencia en el tiempo y la amplia distribución, aunque no siempre las especies más abundantes sean las mismas ya que algunas son más generalistas (*Peridinium*) y otras más especializadas (*Peridiniopsis*). Según Márquez y Guillot (2001) la reserva de fósforo cumple una importante función al moderar las fluctuaciones de este elemento clave y posibilitar mayor persistencia en las estructuras comunitarias.

Existe una tendencia general a que el elemento dominante en el fitoplancton sea el dinoflagelado *Peridinium*, que adquiere su mayor dominancia durante los periodos de estratificación y transición hacia la mezcla, con un ligero descenso en los meses fríos. En general su abundancia es mayor en la estación con mayor influencia del afluente, en este caso el río Guajataca.

Esta especie puede dar coloración marrón al agua con densidades superiores a 100 cel/ml. Este fenómeno de tinción del agua se pudo observar en varios periodos del año, cerca de las orillas en la cola del embalse. Además, la elevada concentración de clorofila en el verano también se atribuye a la proliferación de *Peridinium*, cuyas células grandes contribuyen a un porcentaje alto de biomasa; tienen un volumen entre 80 y 1.000 veces mayor que las otras especies, y aportan una concentración relativa de clorofila muy superior. Según García (1973), el volumen de *P pusillum* y *P incospicuum* es de $4200 \mu\text{m}^3$ muy superior a especies como: *Chlorella ellipsoidea* ($65 \mu\text{m}^3$), *Chlamydomonas* sp ($80 \mu\text{m}^3$) y *Nitzschia acicularis* ($320 \mu\text{m}^3$).

Peridinium es un genero corriente y dominante no solamente en el embalse estudiado; sino en otros embalses tropicales de América Latina como (Neusa, Tominé, Calima y Prado) en Colombia (Marquez y Guillot, 2001).

Euglenophyta

El grupo más importante en la composición del fitoplancton en cuanto a abundancia se refiere es el de las euglenofitas, Dentro de esta división dos fueron los géneros dominantes: (*Euglena sp*) aportando un 87.3% de la biomasa total y el género (*Trachelomona*) con un 12.7%. Estas dos especies adquieren su mayor importancia en el periodo de lluvias. La alta precipitación arrastra sedimentos originando un efecto fertilizante por acción de la escorrentía hacia el embalse, además, un aporte adicional de materia orgánica que favorece los florecimientos de ciertos grupos de algas, en particular euglenofitas.

Otros factores que puedan contribuir con el mayor desarrollo de especies de Euglenophyta en este embalse, son su mayor contenido de materia orgánica y nutrientes. La preferencia de los euglénidos por las aguas ricas en sustancias orgánicas y húmicas, así como el desarrollo de *Trachelomonas* favorecido por el aumento de nitratos y fosfatos es señalada también por Starmach (1983). Hutchinson (1967) indica que este grupo de algas es característico de cuerpos de agua con alto contenido de materia orgánica.

En los climas templados se observa el desarrollo de los euglénidos en los meses cálidos (primavera, verano) y solo unas pocas especies pueden crecer en aguas frías o

incluso debajo de la capa de hielo (Starmach 1983). También, en Guajataca, la temperatura del agua parece tener alguna influencia en la distribución de las especies de Euglenophyta. En la figuras (35 y 36) se resume la distribución de estos flagelados con relación al tiempo y profundidad, observándose su mayor abundancia en el periodo de estratificación plena (verano 2004). Según Wydrzycka (1995) las poblaciones de Euglenophyta son más comunes en las tierras bajas más cálidas que en las altas y más frías.

El género *Trachelomonas* es poco abundante en Guajataca, se pudo encontrar durante todo el año. Sus mayores densidades ocurrieron en abril y mayo a 5 metros de profundidad en la estación 1 (cola del embalse). Según Starmach (1983) la mayoría de especies parecen encontrarse, sobre todo, en pequeños cuerpos de agua, litoral de los lagos o en los ríos de corriente lenta. A diferencia de especies de *Euglena*, las especies de *Trachelomonas* suelen encontrarse también en lagunas grandes incluso produciendo floraciones.

Margalef (1983) reporta el género como un componente del fitoplancton de lagos oligotróficos a mesotróficos en Europa y Norteamérica. Posiblemente la contribución de las especies de *Trachelomonas* en las comunidades algales de ecosistemas acuáticos tropicales, es considerable. Yacubson (1980) observa que el género mejor representado en algunos ambientes acuáticos, calidos y tropicales es *Trachelomonas*.

Chlorophyta

Este grupo sigue en importancia a Pyrrophyta entre los componentes del fitoplancton del embalse Guajataca. Si bien algunas especies se encontraron en mayor o menor proporción a lo largo del año, es en verano cuando presentan la mayor abundancia. Este incremento puede haber sido causado por el aumento de nitrógeno en el agua.

La mayoría de las clorófitas son frecuentes en aguas eutróficas, ricas en calcio con alta relación nitrógeno/fosforo. Uno de las especies más importantes encontrados en Guajataca fue *Botryococcus brauni*. Esta especie es propia de aguas ricas en nutrientes y presentó sus mayores floraciones en el periodo de mayor estratificación.

Las clorofitas del grupo de la desmidiáceas no fueron un componente importante del fitoplancton en el embalse. Esto es debido a que este grupo de algas son sensibles a aguas mineralizadas con alta conductividad y de carácter alcalino. Al parecer presentan intolerancia a concentraciones altas de calcio. No obstante, especies de los generos *Staurastrum* y *Cosmarium* toleran y proliferan con fertilización, si no va acompañada de ascensos de pH, ya que las desmidiáceas sólo pueden utilizar carbono en forma de ácido carbónico (Márquez y Guillot, 2001). Las concentraciones altas de electrolitos, especialmente de calcio, y las condiciones alcalinomesotróficas del embalse parecen impedir el desarrollo de desmidias (Wetzel, 1981).

Las desmideaceas (*Closterium*, *Cosmarium* y *Staurastrum*) las más frecuentes en Guajataca; por su forma, tamaño y densidad son características del plancton posado

en el fondo, desde donde pasan a la columna de agua por turbulencia; fenómeno que se evidenció en la estación 1, con características lacustres y menos profundas. Otra razón importante con relación a su mayor densidad en la cola del embalse que en la presa, es porque toleran concentraciones altas de materia orgánica habituales en estos medios. Sommer (1988) encontró que *Scenedesmus*, es una especie típica en las etapas tempranas de una sucesión luego del enriquecimiento con nutrientes.

Cyanophyta

A pesar del grado de eutrofia de este embalse, este grupo de algas se encontraron escasamente representadas durante el periodo estudiado. Es probable que este hecho pueda relacionarse con la carencia de algún elemento. En Guajataca las cianofíceas están representadas por tres géneros *Chroococcus*, *Microcystis* y *Merismopedia*. A pesar de que no fue un grupo dominante, su presencia en el embalse se dió en ciertas circunstancias ambientales como: elevadas temperaturas, especialmente durante el verano y alta precipitación (Macqueen y Lean, 1987). El florecimiento de Cyanophyta durante la estratificación es un fenómeno regular (anual) en muchos lagos tropicales (Boland y Griffiths, 1996). Son varios los factores que inciden en la aparición y/o florecimientos masivos de Cyanophyta. En el embalse Guajataca durante la estratificación, con el aumento en la temperatura superficial se presentaron apariciones repentinas de *Chroococcus*. De acuerdo a Ramírez (2000), este género es predominantemente planctónico. Algunas especies, como *C. limneticus*, pueden ser dominantes en aguas muy blandas, pero nunca en abundancia suficiente para producir florecimientos.

El género se halla invariablemente en hábitats de desmidias, donde el agua es ácida y puede habitar en aguas con pH hasta de 4 (Prescott, 1970; Margalef 1983). Ambiente contrario al que se encuentra en Guajataca, donde las concentraciones de pH nunca fueron inferiores a 6.5 y sus aguas se mantienen alcalinas durante todo el año, por lo que estas condiciones ambientales impiden el florecimiento masivo de este grupo de algas.

Dada su capacidad de flotación, las especies del género *Chroococcus*; las más comunes en el embalse en estudio, son indicadoras de aguas estratificadas y de etapas avanzadas de la sucesión cuando son más abundantes, esto puede deberse a la estratificación del agua o a alguna forma de contaminación (Marquez y Guillot, 1987).

Generalmente, se sugiere que las Cyanobacterias son mejores competidoras por el nitrógeno, pero pobres competidoras por el fósforo cuando se les compara con otras especies del fitoplancton (Smith 1983, Drenner et al. 1990). Las Cyanobacterias dominarían, por lo tanto, en situaciones en las que la proporción N: P fuera menor que 9. Esto parece quedar en evidencia en este estudio donde la relación promedio para las dos estaciones de N:P fue de 13.47:1 mayor que 9. Sin embargo, la proporción N: P por sí sola no es suficiente para explicar la ausencia o la presencia de las diversas especies en los lagos (Smith, 1983). Sommer (1990), apunta que las tasas de suministro de N y de P, más que la concentración de estos elementos, son las limitantes del crecimiento de las algas.

Cuando la relación N/P del agua se desvía a favor del P, se desarrollan cianofíceas fijadoras de N que introducen nitrógeno procedente de la atmósfera en el sistema. En el embalse Guajataca, a pesar de las características alcalinas y mesotróficas de sus aguas, se encuentra un bajo desarrollo de las cianofíceas fijadoras de nitrógeno. Dos especies hicieron su aparición en el mes de junio: *Microcystis* sp. y *Merismopedia* sp. El desarrollo de las cianofíceas se produce precisamente en los meses en que este cociente es más bajo, cuando el N es limitante (De Hoyos, 1996). En el caso de *Microcystis* se dieron unas apariciones esporádicas en los meses más lluviosos del muestreo.

Posiblemente la escasez de cianofíceas en Guajataca podría tener un algún fundamento químico, por baja concentración de algún oligoelemento no identificado; pH y alcalinidad no pueden actuar como factores limitantes (Planas, 1973).

Chrysophyta

En el embalse Guajataca el grupo Chrysophyta sin incluir diatomeas fue el menos diverso y abundante. Representado por una sola especie (*Dinobryon* sp). Las mayores densidades de este género se presentaron en los meses de diciembre a febrero en la estación 1, cuando se originó una leve mezcla en la columna de agua, por el descenso en la temperatura del agua que originó cambios en la densidad de la columna de agua y la turbulencia generada por los vientos.

Dynobryon es un género frecuente reportado en la literatura limnológica como un componente característico del plancton lacustre, en especial de aguas mineralizadas,

ricas en calcio y en bajas concentraciones de fósforo (Márquez y Guillot, 2001). Éstas propiedades del medio parecen coincidir con los resultados obtenidos en este estudio cuando *Dynobryon* aparece en los meses de diciembre a febrero, meses que registraron los valores más bajos de fósforo, incluso indetectable en ciertas fechas y profundidades. La evidencia estadística demuestra que se presentaron diferencias estadísticas entre estaciones; siendo más abundantes en la estación 1, con características lacustres, mayor grado de mineralización y con aguas ricas en calcio de origen geológico.

Bacillariophyta

Las diatomeas fueron pocos abundantes durante el periodo de estudio. Las Pennales del genero *Synedra* dominaron a este grupo en el embalse Guajataca por su mayor densidad y presencia constante en la mayoría de las muestras. A pesar de que no se presentaron diferencias estadísticas entre estaciones la diferencia numérica es notable; siendo más abundantes en la estación 1. En el verano por las altas temperaturas y el aumento de la precipitación; con los mayores caudales de ingreso y las mayores concentraciones de nutrientes y sólidos suspendidos, se registró una mayor abundancia de diatomeas.

Según Reynolds (1984) estos organismos, característicos de sistemas turbulentos y sometidos a constantes cambios en la calidad de luz debido a sus movimientos a través del gradiente lumínico, son típicos estrategias R.

Diversidad de fitopláncton

Según Margalef (1980), la diversidad refleja las diferencias en las abundancias de las diferentes especies y refleja en gran medida, la organización espacial de la comunidad. La diversidad implica la ordenación de las especies, de manera que es una medida espectral, cuyo valor (5), corresponde a ecosistemas altamente organizados y estables.

La diversidad del fitoplancton de Guajataca fue baja según el índice de Shannon Weiner ($1.67 \text{ bits ind}^{-1}$) para la estación 1 y ($2.21 \text{ bits ind}^{-1}$) para la estación 2. Estos valores indican la alteración de las condiciones ambientales del río al pasar de un régimen fluvial a un embalse (Tundisi, 1990), pero no pueden considerarse indicadoras de determinado estado trófico. Izaguirre et al. (1990) determinaron un rango de 0.67 a $4.51 \text{ bits ind}^{-1}$ en 20 cuerpos de agua ultra-oligo a eutróficos, de la región andino patagónica de Argentina. Sin embargo, no pudieron establecer diferencias de nivel trófico en base al valor de diversidad.

En Guajataca, los valores más altos de diversidad se registraron en la época fría y seca durante los meses de enero, febrero y marzo, cuando la densidad fitoplanctónica fue baja ($< 200 \text{ ind ml}^{-1}$). Los menores valores se registraron en la época cálida y lluviosa, cuando se observaron las mayores densidades de organismos ($> 200 \text{ ind ml}^{-1}$).

Las comunidades sometidas a disturbios frecuentes de mediana intensidad presentan diversidad alta (Reynolds, 1993; Sommer, 1993; Sommer et al. 1993). Esto indicaría que el régimen lótico de la cola del embalse constituye un disturbio frecuente

para la comunidad, probablemente debido a los pulsos provocados por los aportes de nutrientes, materiales particulados y la turbulencia generada en el sistema (De León, et. al, 2003). Branco y Senna (1996), encontraron correlación negativa entre densidad y diversidad. Según Margalef (1997), la disminución de la diversidad indica un incremento de la actividad metabólica de los organismos, de modo que las variaciones de diversidad están asociadas a las características productivas de la comunidad. La marcada estacionalidad de la abundancia y biomasa del fitoplancton y de las características ambientales estudiadas, serían los factores determinantes de las diferencias temporales en la diversidad encontradas en este sistema.

CONCLUSIONES

El embalse Guajataca presentó una estratificación térmica estable durante la mayor parte de año, lo que permitió clasificarlo como cálido monomíctico.

El oxígeno disuelto en la superficie del embalse fue relativamente alto, sin embargo, éste no correspondió a las condiciones hipolimnéticas, ya que se presentaron condiciones de anoxia en el hipolimnion durante todo el periodo de estudio.

Los valores de sólidos suspendidos y turbidez fueron bajos, por lo tanto estos parámetros posiblemente no interfieren en la transparencia del embalse, como tampoco afectan en mayor grado la productividad del mismo.

En el embalse, los valores de la relación NT/PT casi siempre fueron mayores a 9, lo que indicaría que el fósforo fue el principal elemento potencialmente limitante para el desarrollo del fitoplancton.

Los mayores valores de fósforo total se registraron, en general, en los estratos bajos, posiblemente por liberación desde los sedimentos, especialmente durante los periodos de aguas bajas.

El embalse Guajataca se encuentra en estado intermedio de eutrofización con tendencia a la mesotrofía.

A pesar de los altos medianos de fósforo, que podrían promover condiciones de eutrofía, existen factores que impiden que se llegue a esta situación trófica, como son: naturaleza calcarea de la cuenca, alta turbiedad de origen biogenico, escasa transparencia y altos niveles de dureza.

Existe desequilibrio en las relaciones N:P, que muestran que el P es el elemento limitante; en consecuencia existen florecimientos fitoplanctónicos de grupos de algas específicos, como lo son Euglenophyta y Pyrrophyta.

La clorofila *a* reflejó la variación anual de la biomasa del fitoplancton, siendo mayor su concentración en verano, cuando hubo mayor radiación solar.

La diversidad y abundancia del fitoplancton fue baja; se registraron un total de 22 taxones pertenecientes a 20 géneros y 6 clases.

El fitoplancton del embalse Guajataca está dominado por Euglenophyta y Pyrrophyta. Estas algas forman la mayor parte de la biomasa fitoplanctónica durante todo el año, principalmente en verano época en la que se producen los máximos crecimientos algales.

La dominancia de Euglenophyta sugiere una alta concentración de materia orgánica suspendida y disuelta.

La comunidad fitoplanctónica se estructura, básicamente, en relación a la disponibilidad de nutrientes y luz. Su comportamiento sigue estrechamente las variaciones climáticas, particularmente del régimen hidrológico.

RECOMENDACIONES

En virtud de los conocimientos limnológicos actuales sobre la dinámica espacial, temporal y vertical de las variables fisicoquímicas y la comunidad fitoplanctónica del Embalse Guajataca, se considera importante estudiar:

- En el estudio de los sedimentos y de la interfase agua/sedimento para determinar la dinámica de nutrientes y minerales.
- En el estudio de los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, fósforo y hierro como variables controladoras de la biomasa fitoplanctónica.
- En la posible producción de gases (CH_4 y H_2S) como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica.
- En la posible presión ejercida por los peces sobre el zooplancton y el fitoplancton.
- En los estudios de organismos indicadores de calidad de agua de otras comunidades tales como bentos, necton y bacterias.

LITERATURA CITADA

APHA-AWWA-WPCF. 1999. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Part. Washington.

Arar, E., y G. Collins. 1997. In vitro determination of chlorophyll *a* and pheophytin *a* in marine and freshwater algae by fluorescence. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Methods 445.0 Cincinnati, OH.

Beaver, J., y T. Crisman. 1991. Temporal variability in algal biomass and primary productivity in Florida Lakes: relative latitudinal gradients, and trophic state. *Hydrobiology* 224: 89-97.

Bolnad, K.T. y Griffiths, D.J. 1996. Water column stability as major determinant of shifts in phytoplankton dominances: evidence from two tropical lakes in northern Australia.

Branco, C., y P. Senna. 1996. Phytoplankton composition, community structure and seasonal changes in a tropical reservoir (Paranao Reservoir, Brazil). *Algological Studies*, 81: 69-84.

Candelas, G. and G. Candelas. 1964. Plankton studies on Puerto Rico freshwater lakes. Physical and chemical nature. *Carib.J.Sci.* 4 (4): 451-458.

Candenado, C., and L. D'croz. 1983. Ecosistema acuático del lago Bayano. Un embalse tropical. Dirección de Ingeniería. Publicación técnica IRHE. Panamá. 38 pp.

Carlson, R. E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Ocean.* 22(2): 361-369.

Carvajal, J.R. 1979. Ecological survey of lakes. Final report. Project N. F-4. Puerto Rico.

Contreras, F., L.R, Castañeda., R. Alvarado, y F. Gutiérrez. 1996. Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas. *Rev. Biol. Trop.* 44 (2): 417-42

Currie, D. 1990. Large scale variability and interactions among phytoplankton, bacterioplankton and phosphorus. *Limnol. Oceanogr.* 35(7): 1437-1455

De Hoyos, C. 1996. Limnología del Lago de Sanabria: variabilidad interanual del fitoplancton. Univ. Salamanca, PhD Thesis, 438 pp.

De León., L y G. Chalar. 2003. Abundancia y diversidad del fitoplancton en el Embalse de Salto Grande (Argentina – Uruguay). Ciclo estacional y distribución espacial *Limnetica* 22(1-2): 103-113 (2003).

Donato, J. L., E. González., y C. Rodríguez. 1996. Ecología de dos sistemas acuáticos de Páramo. Editorial Guadalupe. Colombia. 164 pp.

Esteves, F.1988. Fundamentos de Limnología. Interciencia. Rio de Janeiro. 575 pp.

Ewell, J.J., y J.L., Whitmore. 1973. The ecological life zones of Puerto Rico and US Virgin Islands. Forest Service Research. Paper ITF-18. 72 pp.

Foy, R.H. 1985. Phosphorus inactivation in an eutrophic lake by the direct addition of ferric aluminum sulphate: impact on iron and phosphorus. *Freshwater Biology*, 15: 613-629.

García de Emiliani, M. 1977. Ciclo anual del fitoplancton en el embalse San Roque (Córdoba, Argentina). *Rev. Asoc. Cienc. Natu. Litoral.* 8: 1-12

García de Emiliani, M. 1993. Seasonal succession of phytoplankton in a lake of the Paraná river floodplain, Argentina. *Hydrobiologia*, 264: 101-114.

García de Emiliani, M.O. 1973. Fitoplancton de la Laguna del Vilá (Gerona, España). *Oecología acuática*, 1: 107-155.

García, J.R. y L. Tilly. 1983. Trayectoria anual de la distribución de nutrientes en el lago La Plata, Toa Alta, Puerto Rico. Centro para estudios energéticos y ambientales. División de Ecología Marina. Universidad de Puerto Rico. 25pp.

García, J.R. y L. Tilly. 1983. Dinámica y distribución del oxígeno disuelto en el lago La Plata, Toa Alta, Puerto Rico. Memorias del noveno simposio de Recursos Naturales. 158-168.

Giani, A. y M.I. Leonardo. 1988. Distribuição vertical de algas fitoplanctônicas no reservatório da Pampulha (Belo Horizonte, MG). *Acta Limnol. Brasil.* 11: 387-404.

Gierbolini, R.E. 1975. Soil survey of Mayagüez area of western Puerto Rico. U.S Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 296 p.

Goldman, C.R. 1976. Ecological aspects of water impoundment in the tropics. *Rev. Biol. Trop.* 24 (1): 87-112.

González, E.J., M. Ortaz, y C. Peñaherrera. 2000. Caracterización limnológica del embalse Pao-Cachinche (Estados Carabobo y Cojedes). Informe técnico presentado a las compañías Hidroven e Hidrocentro. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 1-100 pp.

González, E.J. y M. Ortaz. 1998. Efectos del enriquecimiento con N y P sobre la comunidad del fitoplancton en microcosmos de un embalse tropical (La Mariposa, Venezuela). *Rev. Biol. Trop.* 46: 27-34

González, J., V. Carrillo y C. Peñaherrera. 2004. Características físicas y químicas del embalse Agua fría (Parque Nacional Macarao, Estado Miranda, Venezuela). *Acta científica venezolana*, 55: 225-236

Hallaway, P.E. 1980. A criterion for thermal stratification in a wind-mixed system. *J. Phys. Oceanogr.* 10: 861-869

Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwaters. Principles, problems and restoration. Chapman & Hall. London. 327 pp.

Hooker, E., y S. Hernandez. 1991. Phytoplankton biomasa in lake Xolotlan (Managua), its seasonal and horizontal distribution. *Hydrobiologia.* 25(2): 125-131.

Horne, A.J, Goldman C.R. 1994. *Limnology*. 2nd edition. McGraw-Hill. New York. 576 pp.

Huszar, V.L.M. 1989. Considerações sobre o fitoplâncton da lagoa de Juturnaíba, Araruama, Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Rev. Brasil. Biol.* 49(1): 107-123.

Infante, A. 1988. El plancton de las aguas continentales. Serie de Biología. Monografía No. 33. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington, D. C. 126 pp.

Jorgensen, S.E. y R.A. Vollenweider. 1988. Guidelines of lake management. Vol. 1. Principles of lake management. International Lake Environment Committee. United Nations Environmental Programme. Shiga. Pp. 13-41.

Kalf, J. y R. Knoechel. 1978. Phytoplankton and their dynamics in oligotrophic and eutrophic lakes. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 9: 475-495.

Kalf, J. y S. Watson. 1986. Phytoplankton and its dynamics in two tropical lakes: a tropical and temperate zone comparison. *Hydrobiologia.* 138: 161-176.

Komarék, J. 1986. Modern approach to the classification system of cyanophytes. Arch Hydrobiol. 73 (2): 157-226

Lacroix, G. 1992. Lagos y ríos. Medios vivos. Plural. Barcelona, España. 255 pp.

Lewis, W.M. 1978. Dynamics and succession of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philippines. *J. Ecol.*, 66: 849-880.

Lewis, W.M. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 40: 1779-1787.

Lewis, W.M. 1983. Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela. Limnol Oceanogr. 28: 273-286.

Lewis, W.M. 1987. Tropical Limnology. Ann Rev. Eco. Syst. 18: 159-184.

Margalef, R. 1983. Limnología. Ediciones Omega S.A., Barcelona. Pp. 627-830.

Margalef, R. 1997. *Our Biosphere*. En: *Excellence in Ecology nº 10*. O. Kinne (Ed.). Ecology Institute, Germany.

Márquez, G. y G. Guillot. 2001. Ecología y Efecto Ambiental de Embalses. Universidad Nacional de Colombia. 218 pp.

Maroto, R. 1984. Características físico-químicas del embalse de Agua Fría (Edo. Miranda). Tesis de Licenciatura. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Pp. 1-169.

Martínez, V. M. 2005. Las desmidiáceas (Conjugatophyceae, Chlorophyta) en el lago Ziraguén: un análisis hidrobiológico de su presencia y abundancia. Tesis PhD. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de México. 109 p.

Martínez, G. A. 2002. Development of numeric nutrient criteria for lakes in Puerto Rico. *J. Agric. Univ. P.R.*, 86 (3-4): 139-144.

Martínez, G. A., D., Sotomayor, y L., Pérez. 2005. Determination of numeric nutrient criteria in lakes and reservoirs of Puerto Rico. Final progress report. University of Puerto Rico. College Agricultural Sciences. Agronomy and Soils Department. 59 pp.

Martínez, R. 1979. Estudio comparativo de la limnología de los embalses mayores de Puerto Rico. M.S. Thesis. Dept. Biology. University of Puerto Rico. Río Piedras. 75p

Matlock, M. D., M. Matlock., D. Storm., M.D. Smolen., y W. Henry. 1998. Limiting nutrient determination in lotic ecosystems using a quantitative nutrient enrichment periphytometer. *J. Amer. Water Res. Assoc.* 34(5): 1141-1174.

Muhlhauser, H. A. 1987. Generalidades sobre el uso de índices de cambios ecológicos en ecosistemas acuáticos temperados: una revisión. Segundo Taller Internacional Sobre Ecología y Manejo de Peces en Lagos y Embalses. COPESEA, Documento Técnico N. 9. Universidad de Chile. Pp. 101-111.

Nevares, R. y J. Villamil. 1981. Productividad y contenido nutricional del jacinto de agua *Eichornia Crassipes*, en relación a algunos aspectos limnológicos del Lago Carraízo, P. Puerto Rico. CERR T-096. 161 pp.

Payne, A. 1986. *The ecology of tropical lakes and rivers.* J. Wiley y Sons, Chichester. 301pp.

Planas, M. D. 1973. Composición, ciclo y productividad del fitoplancton del lago Banyoles. *Oecologia acuatica*. 1: 3-106

Parra, O. y C. Bicudo. 1995. Introducción a la biología y sistemática de las algas de aguas continentales. Ediciones Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 268 pp.

Prescott, G. W. 1975. *Algae of the Western Great Lakes Area*. W.M.C.Brown Company Publishers. USA.

Quiñonez, F. 1980. *Limnology of Lake Loíza, Puerto Rico*. U.S Geological Survey. Water Resources Investigations. 109 pp.

Quiñones, F., S. Palacios., A. Vélez., H. Mas., J. Ortiz y J. Rodríguez. 2004. Embalses principales de Puerto Rico. Oficina de Plan de Aguas. Departamento de Recursos Naturales.

Ramírez, J. J. 1987. Contribución al conocimiento de las condiciones limnológicas de la laguna del Parque Norte. *Actualidades Biológicas* 16: 12-30.

Ramírez, J. J. 2000. *Fitoplancton de agua dulce*. Editorial Universidad de Antioquia, Colección Ciencia y Tecnología. Medellín, Colombia, 206 p.

Ramírez, J., y H. Alcaráz. 2002. Dynamics of the phytoplanktonic primary production in a tropical eutrophic system: Parque Norte Lagoon, Medellín, Colombia. *Caldasia*, 24(2) 2002: 411-423

Reynolds, C. S. 1984. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 384 pp.

Reynolds, C. S. 1986. Experimental manipulations of phytoplankton periodicity in large limnetic enclosures in Blelham Tarn. *Hydrobiologia*, 138: 43-64.

Richerson, P. J. y P. J. Neale. 1986. Patterns of temporal variation in lake Titicaca. A high altitude tropical lake. Physical and chemical processes and primary production. *Hydrobiologia*. 138: 205-220.

Roden, E. y J. W. Edmonds. 1997. Phosphate mobilization in iron-rich anaerobic sediments. *Arch. Hydrobiol.* 139: 347-378.

Roldán, G. 1992. Fundamentos de limnología neotropical. Editorial Universidad de Antioquia, Colección Ciencia y Tecnología No. 1, Medellín. Colombia. 529 pp.

Salas, H. J., y P. Martino. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). OPS/CEPIS. 63pp.

Smith, V. H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* 221: 669-671.

Sokal, R. y F. J. Rohlf. 1979. *Biometría. Principios y métodos estadísticos en la investigación biológica*. Ed. Blume, Madrid, 832 pp.

Soler-López, L., R., R. Webb, y R. Carrasquillo-Nieves. 2000. Sedimentation Survey of Lago Guajataca, Puerto Rico. United States Geological Survey (USGS). Water-Resources Investigations Report 00-4044. 20 pp.

Sommer, U. 1986. The periodicity of phytoplankton in lake Constance in comparison to other deep lakes of central Europe. *Hydrobiologia*, 138: 1-7.

Starmach, K. 1983. Flora Śłodkowodna Polski. Euglenophyta-Eugleniny. Tom 3. PWN, Varsovia - Cracovia. 594 p. En: Wydrzycka, U. 1995. Las especies de *Trachelomonas* (Algas: Euglenophyta) en tres lagunas volcánicas de Costa Rica.

Suttle, C. A., y P. J. Harrison. 1988. Ammonium and phosphate uptake rates, N:P supply ratios, and evidence for N and P limitation in some oligotrophic lakes. *Limnol.Oceanogr.* 33(2), 186-202.

Takino, M., y H. Maier. 1985. Limnología de la represa de Borda. *Boletin: Int Pesca.* 12 (2): 67-76

Talling, J. F. 1971. The underwater high climate as a controlling factor in the production ecology of freshwater phytoplankton. *Mus. Mit Int. Verein. Limnol.* 19: 214-243.

Talling, J. F. 1986. The seasonality of phytoplankton in African lakes. *Hydrobiologia,* 138: 139-160.

Talling, J. F. 1987. The phytoplankton of lake Victoria (East Africa). *Arch. Hydrobiol,* 25: 229-256.

Talling, J. F y J. Lemoalle. 1998. *Ecological Dynamics of tropical Inland Waters.* Cambridge University Press. 441p.

Tilly, L y J. García. 1983. Background for Management of Tropical Reservoirs in Puerto Rico. International symposium of North American Lake Mangement Society (NALMS). 16 pp.

Torres-Orozco, R. E., C. Jiménez-Sierra y A. Pérez. 1996. Some limnological features of three lakes from Mexican neotropics. *Hydrobiologica.* 341: 91-99

Tundisi, J. G. 1986. Primary production. Standing stock of phytoplankton and ecological factor in a shallow tropical reservoir. *Medio Ambiente y Represas*. 1: 138-172.

Tundisi, J. G. y M. Straskraba. 1999. Theoretical reservoir ecology and its applications. International Institute of Ecology, Brazilian Academy of Sciences and Blackhuys Publishers. São Carlos, Rio de Janeiro and Leiden. pp. v-vi.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2000. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirous. EPA. 822-B00-001.

Valido, A. 1975. Food habit studies of *Tilapia mossambica* and *Dorosoma petenense* in Guajataca Reservoir, Puerto Rico. Master Thesis. University of Puerto Rico. 65p.

Welch, P. S. 1952. *Limnology*. Mc Graw Hill. Inc. 2nd. ed. New York..538 p.

Wetzel, R. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega S. A. Barcelona.

Wetzel, R. y G. Likens. 1979. *Limnological Analyses*. Saunders, Boston. 357 pp.

Wetzel, R. 2001. *Limnology. Lake and river ecosystems*. 3rd edition. Academic Press. San Diego, Ca. 1006 pp.

Vollenweider, R. A. y J. J. KERKES. 1981. Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication. In: restoration of lakes and inland waters. EPA/440/5-81-010. p. 25-36.

Wunderlich, W. O. y R. A. Elder. 1973. Mechanics of flow through man made lakes. En: Roldán, G. fundamentos de *Limnología neotropical*. 529p.

Zalocar de Domitrovic, Y. 1992. Fitoplancton de ambientes inundables del río Paraná (Argentina). *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 25(3): 177-188.

ANEXOS

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	27.3	27.5	29	30.3	29.4	29.5	28.5	28.3	27.5	26.2	25.3	25.8
1	27.1	27.5	28.6	29.7	29.3	29.3	27.7	27.6	27.5	26.2	25.3	25.7
2	27.1	27.4	27.4	28.5	28.7	28.4	27.4	27.4	27.3	26.1	25.3	25.7
3	26.7	27.4	27.3	27.9	28.4	28	27.4	27.2	27.3	26.1	25.3	25.7
4	26.7	27.3	27.1	27.3	28	27.5	27.3	27.2	27.1	26.1	25.2	25.5
5	26.3	27.3	26	26.7	27.6	26.7	27.1	27	27	26	25.2	25.5
6	26.3	27.1	26.1	26.5	27	26.3	27	26.8	27	26	25.2	25.5
7	25.8	27	26.1	26.4	26.7	26	26.8	26.5	26.8	25.8	25.1	25.5
8	25.8	26.9	26	26.4	26.1	25.8	26.6	26.4	26.8	25.8	25.1	25.3
9	25.8	26.5	26	26.1	25.9	25.8	26.1	26	26.5	25.7	25	25.3
10	25.3	26.1	25.8	26	25.7	25.5	25.7	25.8	26.3	25.7	25	25.1

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	27.5	28.2	29.2	30.6	29.7	30.1	28.7	28.4	27.7	26.4	25.5	26
2	27.3	27.9	29	30	29.5	29.9	28.6	28.4	27.6	26.3	25.5	26
4	27	27.8	28.6	29.4	29	29.5	28.6	28	27.6	26.3	25.6	26
6	26.4	27.8	27.9	28.7	28.8	28.3	27.7	27.8	27.4	26.2	25.3	25.9
8	26	27.7	27.4	27.5	28.4	27.8	27.6	27.6	27.3	26.2	25.3	25.8
10	25.4	27.7	26.8	26.5	27.6	27.5	27.4	27.6	27.2	26.2	25.4	25.8
12	25	27.6	26.7	26.3	27	27.1	27.2	27.3	27.1	26.1	25.4	25.8
14	25	27.4	26.5	26.1	26.8	26.6	26.9	27.3	26.9	26	25.3	25.6
16	24.8	27.1	26.5	26	26.5	26.1	26.7	26.8	27	26	25.3	25.6
16	24.5	26.5	26.3	25.8	26.2	26	26.3	26.8	27	26.1	25.3	25.3
20	24.4	26.3	26.4	25.8	26	26.4	26	26.3	26.9	26.1	25.3	25.3
22	24.3	26.1	26.1	25.6	25.8	26.1	25.7	26.3	26.7	25.9	25.1	25
24	24.3	25.8	25.9	25.7	25.5	25.8	25.6	26.2	26.3	25.9	25	25
26	24.2	25.6	25.5	25.6	25.5	25.7	25.6	25.8	26.3	25.7	25	25

Anexo 1. A. Temperatura (°C) para (E1) y B. Temperatura (°C) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	D	O	N	D	E	F
0	7.4	8.6	8.21	7.38	7.86	8.06	8.46	7.89	7.24	7.1	7.13	6.07
1	7.3	8.4	7.73	7.76	7.37	7.68	8.9	7.67	7.13	6.78	7.03	5.85
2	6.98	7.65	7.06	5.73	6.89	6.54	7.22	7.32	7.11	6.45	6.71	5.63
3	5.43	6.43	5.6	4.51	4.56	5.6	6.44	6.98	6.75	5.96	6.33	5.21
4	4.37	5.32	4.41	3.45	3.9	4.9	6.05	6.32	6.23	5.94	5.85	4.46
5	3.9	4.35	3.65	3.18	2.98	4.3	3.4	4.27	5.78	5.88	4.89	4.49
6	3.87	4.11	3.48	2.35	1.68	3.6	2.24	4.52	4.88	5.67	4.55	4.42
7	3.64	3.76	2.75	2.4	1.64	3.2	3.93	3.78	4.35	4.79	4.11	4.38
8	2.51	3.23	1.54	1.72	1.59	2.96	2.83	3.21	3.87	4.23	3.98	4.35
9	2.28	2.37	1.32	1.32	1.51	2.21	2.75	2.62	2.91	3.98	3.87	4.34
10	1.73	1.08	0.79	0.93	0.78	1.89	2.49	1.51	2.3	3.45	3.56	4.23

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	7.45	8.18	8.06	7.56	7.93	7.79	7.93	7.53	7.21	7.2	6.79	6.62
2	5.4	7.81	7.68	6.96	7.29	6.74	6.81	7.24	6.98	7.21	6.75	6.82
4	5.41	6.43	4.37	6.72	6.21	5.23	5.61	7.12	6.34	6.57	6.71	6.45
6	4.82	5.67	2.8	5.43	4.18	4.56	3.89	5.12	5.13	6.43	5.97	5.31
8	3.2	4.32	2.43	3.98	3.03	2.78	2.87	2.79	3.87	5.27	5.45	3.98
10	3.08	2.7	1.71	1.3	1.54	0.87	2.06	1.37	2.87	3.31	4.3	3.96
12	3.08	2.1	1.56	1.21	1.34	0.86	1.75	1.45	1.57	3.05	4.32	3.91
14	3.03	1.72	1.43	1.45	0.7	0.78	2.06	1.33	1.31	2.67	3.5	4.6
16	2.91	1.12	1.38	1.38	0.59	0.7	0.98	1.2	1.25	2.32	2.54	4.6
18	2.91	1.04	1.3	1.34	0.87	0.6	0.77	0.98	1.46	2.16	2.5	4.36
20	2.87	1.03	1.02	1.27	0.76	0.54	0.69	0.79	1.23	2.12	2.54	3.6
22	2.36	1.07	1.02	1.32	0.65	0.32	0.65	0.65	1.16	1.97	2.5	3.68
24	1.28	1.32	1.04	0.7	0.87	0.29	0.56	0.45	1.05	1.9	2.3	2.97
26	1.2	0.72	0.96	0.7	0.65	0.29	0.56	0.57	0.89	1.76	2.31	2.9

Anexo 2. A. Oxígeno disuelto (mg/l) para (E1) y B. Oxígeno disuelto para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	7.89	8.35	8.54	8.56	8.41	8.06	7.98	8.33	7.89	7.92	7.76	7.81
1	7.71	8.1	8.39	8.45	8.31	7.98	7.91	8.11	7.77	7.9	7.76	7.8
2	7.5	8.1	8.3	8.23	8.22	7.87	7.83	8.04	7.56	7.9	7.6	7.7
3	7.47	7.89	7.6	8.09	7.98	7.8	7.79	7.96	7.5	7.83	7.65	7.65
4	7.4	7.77	7.41	7.65	7.72	7.77	7.68	7.72	7.49	7.76	7.61	7.65
5	7.33	7.69	7.26	7.32	7.6	7.33	7.45	7.61	7.41	7.8	7.61	7.65
6	7.33	7.61	7.26	7.08	7.48	7.34	7.34	7.53	7.38	7.77	7.6	7.53
7	7.37	7.55	7.25	7.22	7.35	7.31	7.09	7.32	7.36	7.41	7.54	7.25
8	7.3	7.55	7.25	7.3	7.27	7.26	7.13	7.25	7.25	7.34	7.51	7.25
9	7.31	7.33	7.25	7.12	7.2	7.17	7.04	7.18	7.47	7.4	7.2	7.18
10	7.29	7.32	7.23	7.09	7.11	7.09	7.02	7.15	7.3	7.34	7.2	7.18

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	7.98	8.3	8.49	8.43	8.34	7.97	7.92	8.27	7.74	7.9	7.68	7.9
2	7.96	8.24	8.39	8.31	8.28	7.93	7.86	8.21	7.81	7.9	7.56	7.7
4	7.95	7.9	8.32	8.36	8.12	7.88	7.78	8.32	7.77	7.88	7.56	7.68
6	7.95	7.85	8.18	8.3	8.11	7.65	7.65	8.2	7.65	7.78	7.5	7.87
8	7.94	7.78	7.67	7.87	8.1	7.48	7.56	8.07	7.78	7.76	7.48	7.87
10	7.93	7.69	7.5	7.25	7.56	7.35	7.32	8.32	7.82	7.7	7.44	7.56
12	7.87	7.62	7.56	7.3	7.43	7.34	7.25	8.13	7.72	7.61	7.41	7.43
14	7.78	7.57	7.45	7.25	7.22	7.34	6.78	7.98	7.71	7.68	7.41	7.42
16	7.75	7.45	7.4	7.23	7.34	7.31	6.79	7.89	7.54	7.45	7.48	7.28
18	7.63	7.4	7.37	7.21	7.35	7.23	7.03	7.54	7.59	7.44	7.5	7.28
20	7.58	7.41	7.43	7.21	7.23	7.2	6.98	7.54	7.45	7.3	7.5	7.28
22	7.55	7.53	7.3	7.19	7.22	7.23	6.99	7.4	7.45	7.34	7.37	7.21
24	7.3	7.32	7.31	7.11	7.04	7.1	6.87	7.5	7.2	7.1	7.31	7.17
26	7.25	7.29	6.82	6.93	6.87	6.91	6.78	6.92	6.95	7.1	7.13	7.17

Anexo 3. A. pH para (E1) y B. pH para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	295.1	248.5	253	231.3	260	257.9	260	268.7	290.5	294.5	308.7	297.1
1	295.6	232.7	252.7	228.9	260.2	250.8	251.9	270	286.7	290	309	299.6
2	291.3	243	254	245	245	267	254	274.5	280	290.3	309.4	302.4
3	295.7	239.9	260	256.7	256.7	270.9	255.6	281	287.9	293.2	312.4	308.3
4	296.8	264.1	269.7	300.5	300.5	253.1	260	286.9	293	295	310	308
5	296.9	266.7	288.3	312.7	261.9	271.5	271.5	296	295.7	295.5	312.6	310.6
6	297.4	274.3	290	321	287	277	276.8	296.7	294	297.3	318	312.5
7	291.1	281	296.5	318.7	297.8	281.4	280	297.8	297.3	298.4	318.5	312.9
8	298.3	287.5	303	324	324.6	290.1	281.3	300.3	301	298	320	314
9	308.7	293	321.7	325.9	342.7	312.7	292	308.4	302.8	302.7	322.1	315.7
10	312.6	297.2	338.3	327.2	360.1	326.8	298.7	310	307.3	303	322	315

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	281.5	278.6	254	233.5	259.8	267.4	267.4	264	281	290.3	297.5	300.1
2	293.1	278.9	254	226.1	259	265.7	271.8	273.1	282.3	287.7	299.1	300
4	293.8	280	259	245.9	243.3	260	273	270.1	285.9	289	302.4	298.7
6	285	285.5	267.8	276	254	266.7	271.2	273.5	287	290.1	299.6	302.7
8	297.3	286	303.1	311.6	266.1	279	272	251.3	290	290.7	303.3	305
10	297.4	286.9	304	302	279.4	276.3	273.8	285	291.3	291.3	308.3	305.4
12	299.6	290.3	304.9	300.3	287.3	285.6	278.3	286.3	291.9	291	308	309.8
14	300	285	314.7	301.4	291.4	298.4	280.2	287.1	293	288.9	312.5	310
16	300.7	287.6	322	303.2	297.1	307.2	285.4	289.4	294.8	293.2	313	312
18	302.4	287.9	328.6	308.5	304.1	324	290	290	295	297	317.1	315.6
20	302.9	292.4	329.7	309	323.5	330.2	298.1	292.8	299.3	297.8	317	316
22	307.4	297	323.7	310.2	328.9	324.5	298	292	300.5	302.5	319.2	316.7
24	317.6	302.8	339.5	318.7	336.9	343.1	319.3	302.4	309.7	303	320.1	318.5
26	317	302	338.2	319.3	340.6	354.7	323	307.8	310.4	307	321	318

Anexo 4. A. Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) para (E1) y B. Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	0.295	0.487	0.609	0.411	0.420	0.584	0.400	0.382	0.359	0.370	0.270	0.247
1	0.288	0.528	0.807	0.545	0.476	3.034	0.410	0.440	0.390	0.290	0.316	0.289
5	0.305	0.474	0.516	0.383	0.369	0.698	0.352	0.376	0.364	0.263	0.217	0.190

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	0.210	0.404	0.473	0.352	0.347	0.384	0.396	0.387	0.360	0.340	0.250	0.220
1	0.201	0.379	0.513	0.348	0.424	0.321	0.415	0.400	0.470	0.330	0.230	0.186
6	0.211	0.370	0.444	0.344	0.377	0.524	0.370	0.325	0.383	0.320	0.270	0.173

Anexo 5. A. Nitrógeno total (mg/l) para (E1) y B. Nitrógeno total (mg/l) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	0.020	0.050	0.047	0.043	0.035	0.063	0.037	0.037	0.028	0.021	0.022	0.019
1	0.024	0.055	0.076	0.066	0.046	0.229	0.039	0.042	0.031	0.023	0.024	0.023
5	0.033	0.047	0.041	0.046	0.026	0.034	0.034	0.035	0.027	0.025	0.023	0.024

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	0.0153	0.0320	0.0265	0.0303	0.0193	0.0160	0.0245	0.0273	0.0260	0.0200	0.0192	0.0179
1	0.0183	0.0237	0.0238	0.0333	0.0247	0.0190	0.0223	0.0302	0.0234	0.0180	0.0212	0.0110
6	0.0145	0.0247	0.0215	0.0338	0.0247	0.0250	0.0181	0.0242	0.0200	0.0220	0.0170	0.0121

Anexo 6. A. Fósforo total (mg/l) para (E1) y B. Fósforo total (mg/l) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	0.002	0.006	0.017	0.018	0.022	0.024	0.021	0.018	0.009	0.008	0.002	0.002
1	0.003	0.008	0.038	0.025	0.022	0.035	0.022	0.025	0.008	0.009	0.003	0.000
5	0.002	0.008	0.011	0.020	0.025	0.020	0.020	0.005	0.002	0.001	0.000	0.002

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	0.001	0.006	0.008	0.019	0.026	0.0180	0.009	0.007	0.004	0.002	0.001	0.003
1	0.000	0.0080	0.010	0.016	0.021	0.0120	0.008	0.002	0.003	0.002	0.000	0.000
5	0.000	0.008	0.007	0.016	0.022	0.0130	0.005	0.002	0.003	0.000	0.002	0.000

Anexo 7. A. Fósforo disponible (mg/l) para (E1) y B. Fósforo disponible (mg/l) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	3.1	4.02	3.40	2.20	1.93	2.31	5.67	1.20	2.45	2.79	2.40	2.20
1	2.78	3.70	5.80	3.98	2.87	5.56	9.31	2.30	2.50	3.87	3.65	3.89
5	8.7	11.30	8.34	4.93	2.83	7.67	13.48	4.90	5.45	5.18	4.76	4.98

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	2.4	2.41	2.675	1.8	1.35	2.11	3.23	0.87	1.85	1.2	2.1	2.63
1	2.1	2.85	3.23	1.8	1.53	3.34	4.35	0.91	1.9	0.5	1.78	2.67
6	2.7	2.50	2.96	2.2	1.6	4.55	5.23	0.81	2.12	1	2.1	2.55

Anexo 8. A. Turbidez (NTUI) para (E1) y B. Turbidez (NTUI) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	2.15	1.23	4.9	3.00	2.73	3.32	5.56	1.87	3.22	3.77	4.45	4.21
1	4.85	1.93	5.5	3.33	2.71	3.73	9.11	2.65	3.34	3.14	5.56	4.76
5	7.85	6.47	6	3.41	2.78	4.68	11.67	1.79	4.98	4.69	5.29	6.73

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	1.75	1.47	4.1	2.92	2.54	3	3.31	0.94	1.43	1.49	2.27	2.15
1	7.5	1.13	3.9	3.04	2.75	3.05	4.12	3.23	3.57	4.24	4.16	3.62
6	2.9	1.30	2.5	3.47	2.86	4.25	7.85	1.45	4.87	4.67	4.78	4.55

Anexo 9. A. Sólidos suspendidos (mg/l) para (E1) y B. Sólidos suspendidos (mg/l) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	1.682	15.46	16.92	10.22	8.18	15.43	12.77	10.78	10.32	9.87	3.49	2.45
1	2.661	14.50	43.98	26.77	15.24	23.45	16.86	13.57	17.11	13.45	4.52	3.93
5	3.060	5.32	8.34	5.75	3.85	7.34	7.12	2.61	4.73	5.63	2.38	2.16

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	1.446	3.61	22.43	3.05	3.83	9.89	8.78	8.13	7.84	5.34	2.79	1.32
1	3.037	5.27	17.82	4.99	4.06	11.32	6.79	9.58	6.33	4.31	3.85	2.87
6	2.145	6.24	27.60	6.18	4.25	6.75	5.19	6.45	7.72	3.88	4.32	3.11

Anexo 10. A. Clorofila a ($\mu\text{g/l}$) para (E1) y B. Clorofila a ($\mu\text{g/l}$) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	10	47	39	28	27	43	32	57	36	21	18	13
1	16	41	34	12	26	39	48	39	41	28	23	17
5	5	12	7	37	18	16	9	13	11	4	2	5

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	6	16	43	18	27	21	33	27	29	24	13	9
1	14	31	31	12	26	23	41	18	24	14	15	12
6	3	7	13	4	18	12	9	6	1	3	12	6

Anexo 11. A. Chlorophyta (cel/ml) para (E1) y B. Chlorophyta (cel/ml) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	117	95	93	140	131	121	132	95	86	78	84	73
1	162	87	118	188	115	143	119	91	75	91	121	113
5	9	35	13	22	41	91	86	48	56	65	76	39

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	75	75	103	208	99	103	98	87	76	67	78	85
1	114	83	76	117	126	118	84	95	61	80	67	90
6	39	54	42	26	70	78	66	57	54	43	45	33

Anexo 12. A. Euglenophyta (cel/ml) para (E1) y B. Euglenophyta (cel/ml) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005.

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	97	121	108	95	103	91	85	75	64	73	64	62
1	70	103	124	70	80	96	91	78	68	57	51	67
5	34	23	25	69	56	58	60	49	53	44	43	51

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	54	97	65	51	78	63	75	68	54	81	52	69
1	32	112	34	123	99	87	80	73	59	67	59	56
6	21	30	99	48	80	70	38	57	45	53	63	32

Anexo 13. A. Pyrrophyta (cel/ml) para (E1) y B. Pirrophyta (cel/ml) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	8.0	7.0	7.0	11.0	16.0	13.0	14.0	15.0	11.0	9.0	5.0	1.0
1	12.0	26.0	9.0	5.0	4.0	6.0	3.0	11.0	15.0	11.0	0.0	6.0
5	3.0	15.0	5.0	9.0	6.0	3.0	9.0	1.0	3.0	4.0	2.0	3.0

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
15	3	4	13	1	7	5	5	13	11	16	13	5
1	2	7	21	0	9	8	9	9	7	21	4	9
5	5	11	17	1	6	4	6	11	8	14	7	11

Anexo 14. A. Cyanobacteria (cel/ml) para (E1) y B. Cyanobacteria (cel/ml) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	1.0	6.0	2.0	2.0	4.0	3.0	2.0	2.0	5.0	5.0	7.0	4.0
1	5.0	4.0	13.0	3.0	2.0	2.0	1.0	0.0	2.0	6.0	5.0	6.0
5	9.0	9.0	21.0	4.0	6.0	8.0	9.0	14.0	9.0	15.0	13.0	16.0

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	0.0	6.0	3.0	1.0	3.0	4.0	0.0	6.0	7.0	4.0	5.0	2.0
1	0	13	2	4	0	2	1	3	5	3	3	7
6	3	11	26	3	1	4	5	8	9	11	9	13

Anexo 15. A. Bacillariophyta (cel/ml) para (E1) y B. Bacillariophyta (cel/ml) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005

A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	24	12	8	3	2	0	0	3	18	41	39	26
1	12	4	2	0	1	0	0	0	9	39	21	21
5	3	2	0	0	0	0	0	5	3	11	3	8

B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	13	7	4	0	0	1	3	0	9	14	17	7
1	0	1	5	0	0	1	1	2	7	11	23	3
6	5	1	2	1	0	0	0	1	1	2	4	0

Anexo 16. A. Chrysophyta (cel/ml) para (E1) y B. Chrysohyta (cel/ml) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005

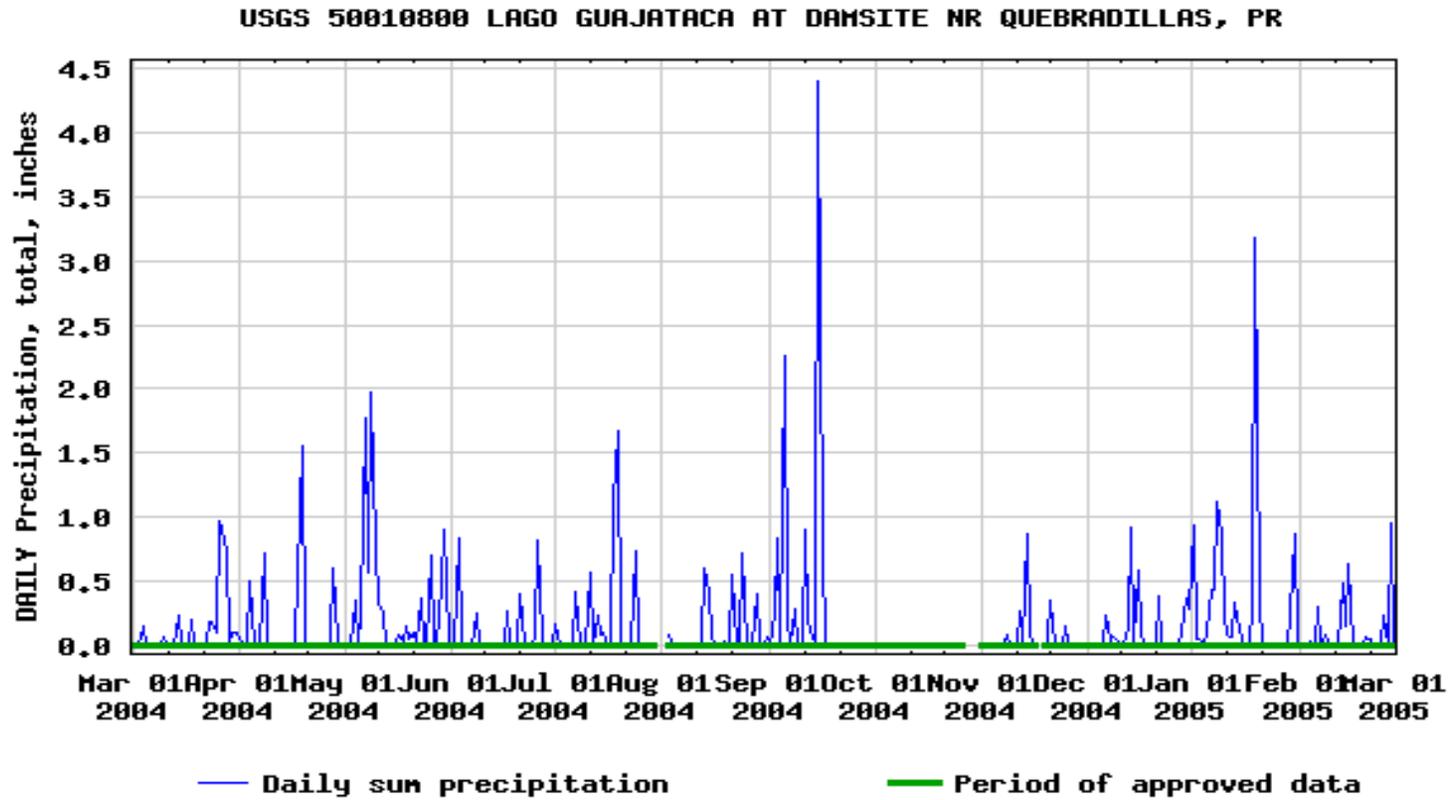
A.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	257	288	257	279	283	271	265	249	220	227	217	179
1	277	265	300	278	228	286	262	219	210	232	221	230
5	63	96	71	141	127	176	173	130	135	143	139	122

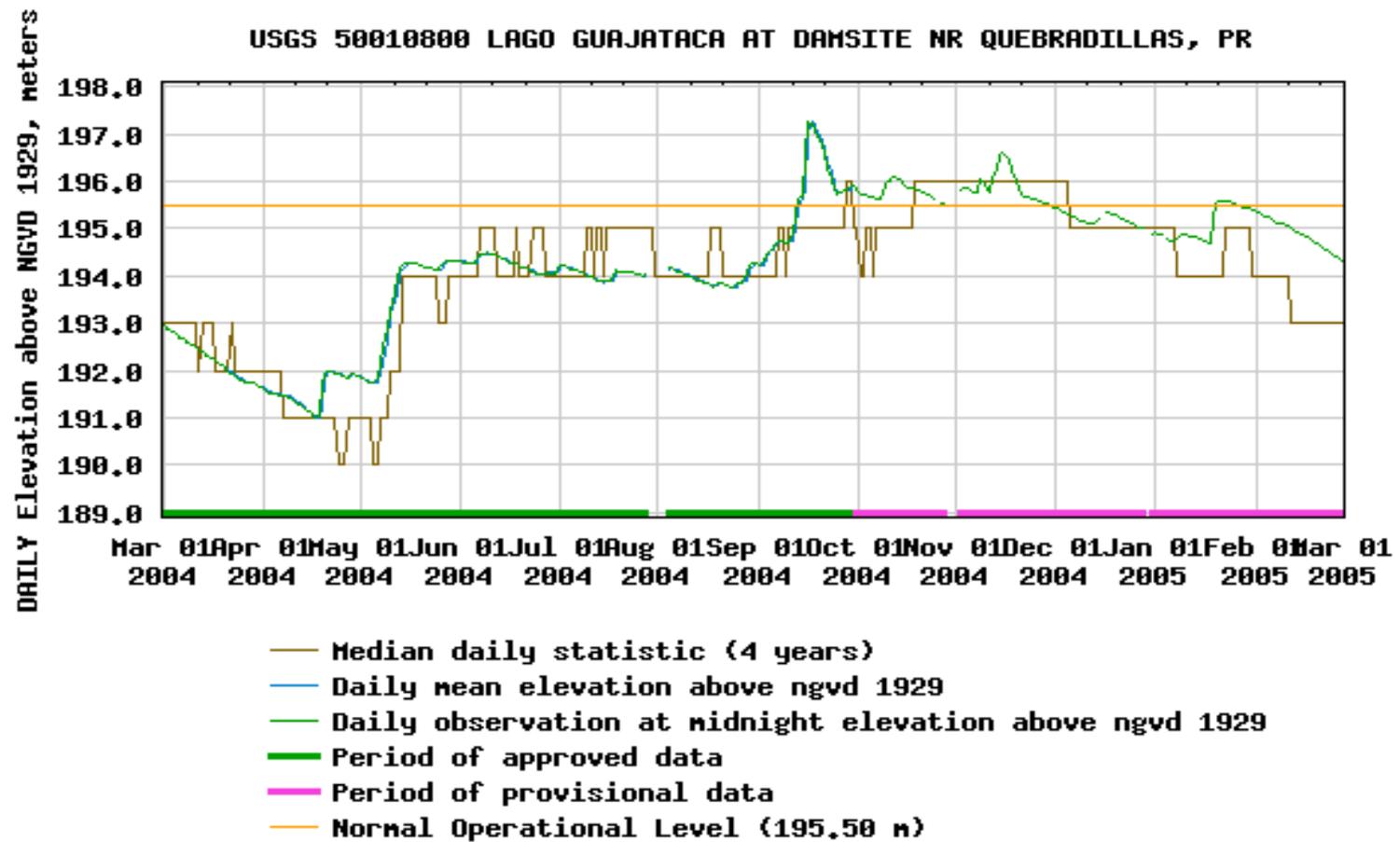
B.

Profundidad (m)	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
0	151	205	231	259	214	197	214	201	186	206	178	177
1	162	247	169	256	260	239	216	200	163	196	171	177
5	76	114	199	83	175	168	124	140	118	126	140	95

Anexo 17. A. Fitoplancton total (cel/ml) para (E1) y B. Fitoplancton total (cel/ml) para (E2) de marzo de 2004 a febrero 2005



Anexo 18. Precipitación total (pulgadas) sobre el embalse Guajataca desde marzo de 2004 a febrero de 2005.



Anexo 19. Nivel del embalse Guajataca (m) desde marzo de 2004 a febrero de 2005.

TIEMPO	Precipitación (mm)	Nivel del embalse (m)	Capacidad (millones m ³)
marzo	102.87	192.25	29.42
abril	118.36	191.56	26.48
mayo	236.22	193.52	32.48
junio	69.85	194.25	35.64
julio	132.08	194.1	32.48
agosto	75.43	193.95	32.48
septiembre	259.08	195.61	38.91
octubre	0.00	195.79	38.91
noviembre	49.27	195.89	38.91
diciembre	88.64	195.2	35.64
enero	251.46	195	35.64
febrero	78.74	194.88	35.64
PROM	121.83	194.33	34.39

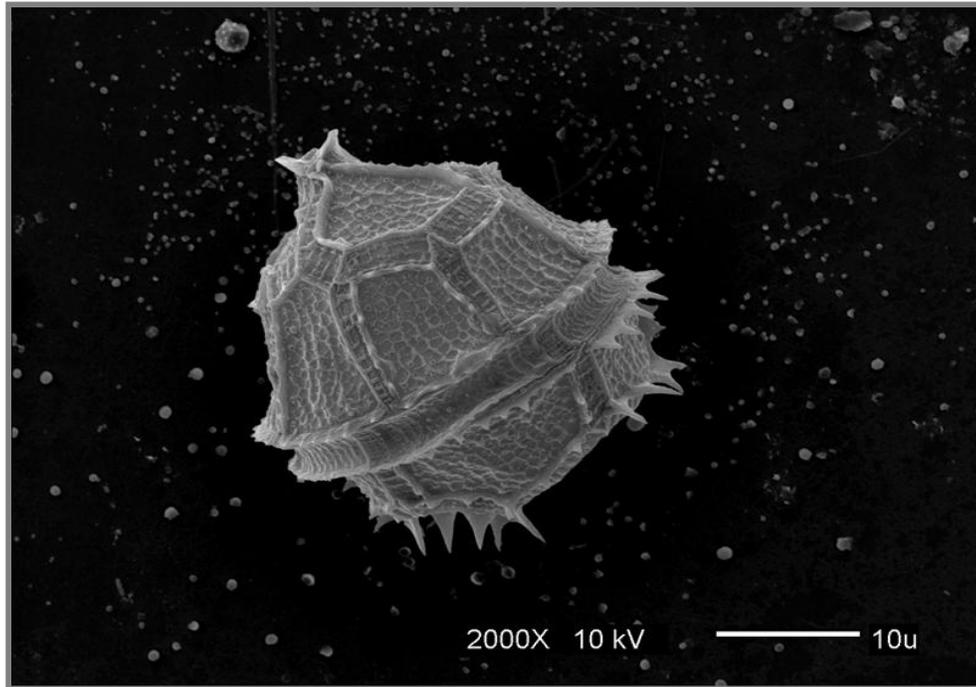
Anexo 20. Precipitación (mm), nivel del embalse (m) y Capacidad de almacenamiento (millones m³) del embalse Guajataca desde marzo de 2004 a febrero de 2005.



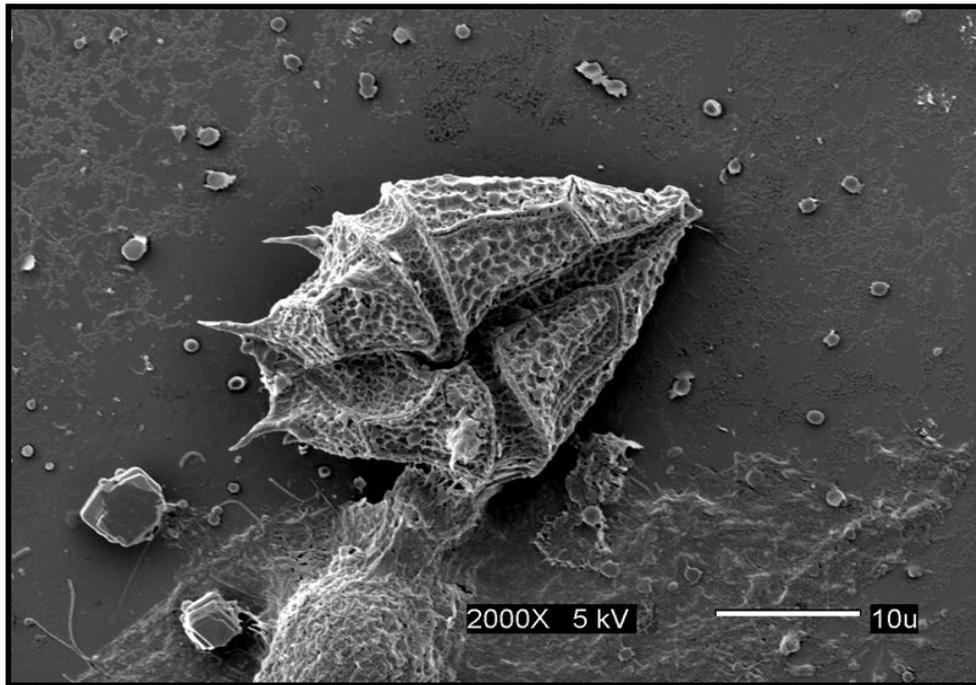
Anexo 21. Chlorophyta. *Pandorina morum*. Celulas de 12 a 18 μm , Colonia ovalada, formada por 16 células. Las células conglomeradas en la parte central de una masa gelatinosa, con dos flagelos. Cloroplastos grandes en forma de taza. Manchas oculares de las células anteriores a menudo mayores que las células posteriores, dos vacuolas contráctiles.



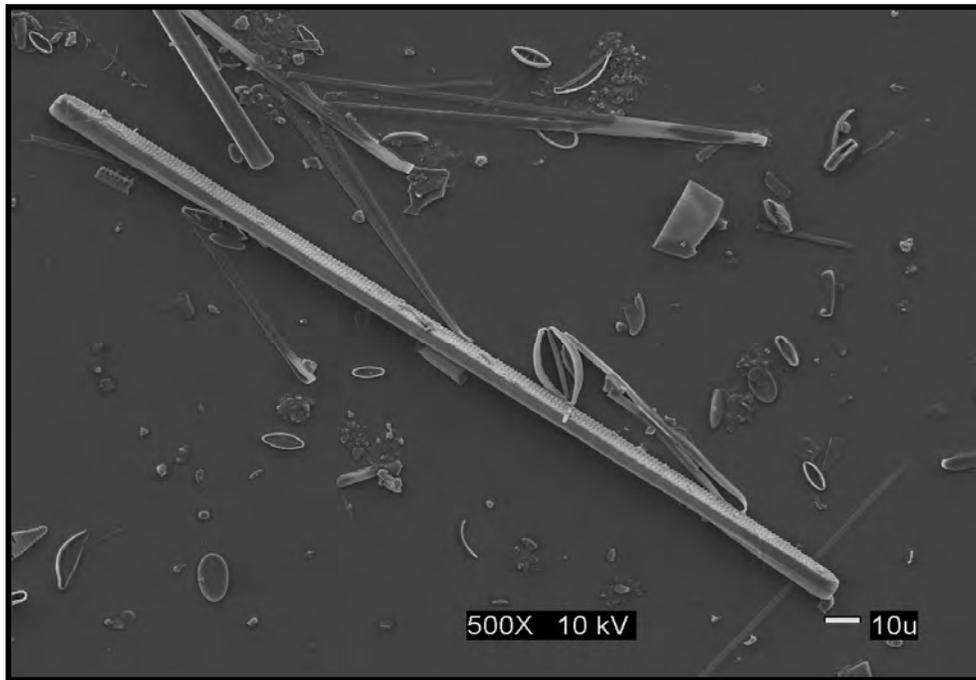
Anexo 22. Euglenophyta. *Euglena sp.* *Euglena* metabólica de 30 μm , en fase estacionaria o modificada por la fijación. Estigma y citofaringe no visible, en el margen derecho se nota muy ligeramente la estriación de la película, exclusiva de Euglenophyta.



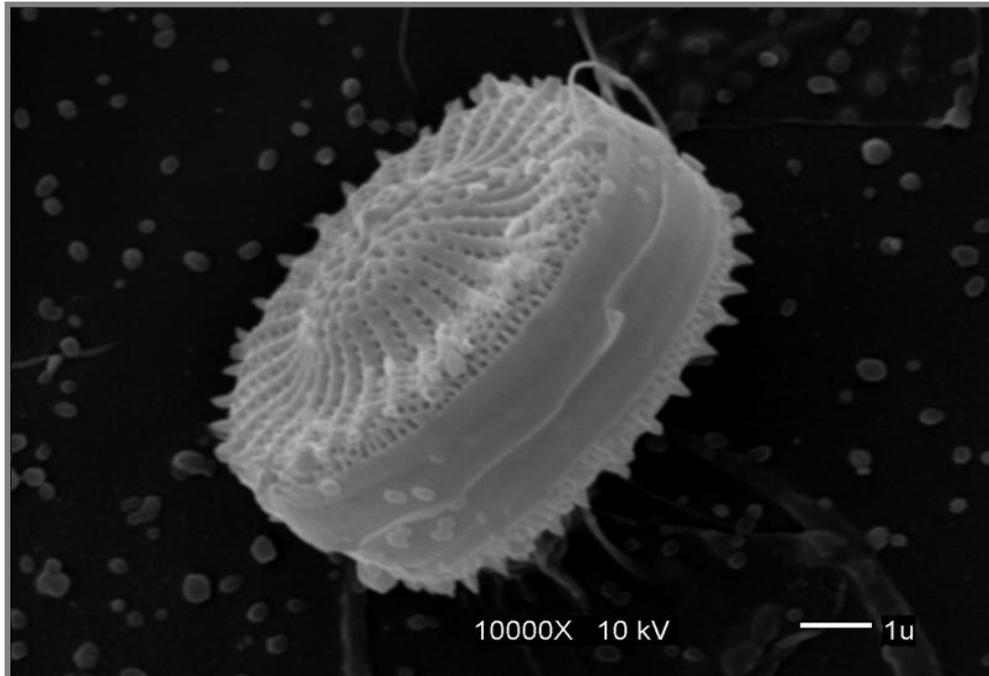
Anexo 23. Pyrrophyta. *Peridinium* sp. Células esféricas a ovaladas, surco transversal profundo y ancho, sección inferior de la hipoteca con pequeñas varillas en forma de espinas, cloroplasto de color pardo rojizo, aproximadamente 40 μm de largo y 30 μm de ancho.



Anexo 24. Pyrrophyta. *Peridiniopsis* sp. Células alargadas de 30 μm de largo y 20 μm de ancho. Surco transversal (cingulum) profundo y ancho, atravesado por el surco longitudinal (sulcus) muy ancho y profundo, las placas de celulosa de la teca tienen forma rugosa como una semilla, la parte inferior de la hipoteca con múltiples espinas afiladas.



Anexo 25. Bacillariophyta. *Synedra* sp. Células solitarias, de 100 a 300 μm de largo y 5 a 10 μm de ancho, sin valvas intercalares, valvas lanceoladas, extremos redondeados, estrías transversales muy marcadas.



Anexo 26. Bacillariophyta. *Cyclotella* sp. Célula redondeada de 6 a 10 μm de diámetro, estrías radiales muy marcadas, bordes de las valvas onduladas (vista pleural), con terminaciones en forma de espinas, cloroplastos en forma de pequeñas placas debajo de las valvas.

The SAS System
The GLM Procedure

10:02 Martes, Diciembre 12, 2006 174

TEMPERATURE

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1.6133333	1.6133333	0.71	0.4043
Error	46	104.7391667	2.2769384		
Corrected Total	47	106.3525000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	TEMP Mean
0.015170	5.401173	1.508953	27.93750

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	1.6133333	1.6133333	0.71	0.4043

Anexo 27. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para la temperature entre estaciones.

Ph

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	0.10453333	0.10453333	0.28	0.5996
Error	46	17.20366667	0.37399275		
Corrected Total	47	17.30820000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	OXIG Mean
0.006040	8.159433	0.611549	7.495000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	0.10453333	0.10453333	0.28	0.5996

Anexo 28. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para el oxígeno disuelto entre estaciones.

Ph

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	0.00067500	0.00067500	0.01	0.9246
Error	46	3.42845000	0.07453152		
Corrected Total	47	3.42912500			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PH Mean
0.000197	3.384530	0.273005	8.066250

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	0.00067500	0.00067500	0.01	0.9246

Anexo 29. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para el pH entre estaciones.

CONDUCTIVITY

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	45.04688	45.04688	0.09	0.7635
Error	46	22618.50792	491.70669		
Corrected Total	47	22663.55479			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	COND Mean
0.001988	8.166574	22.17446	271.5271

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	45.04687500	45.04687500	0.09	0.7635

Anexo 30. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para la conductividad entre estaciones.

NITROGEN

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	0.38646352	0.38646352	6.49	0.0213
Error	46	7.13363696	0.15507906		
Corrected Total	47	7.52010048			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	N Mean
0.051391	90.06737	0.393801	0.437229

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	0.38646352	0.38646352	6.49	0.0213

Anexo 31. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para el nitrógeno total entre estaciones.

PHOSPORUS

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	0.00645888	0.00645888	7.17	0.0102
Error	46	0.04143075	0.00090067		
Corrected Total	47	0.04788963			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	P Mean
0.134870	87.66642	0.030011	0.034233

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	0.00645888	0.00645888	7.17	0.0102

Anexo 32. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para el fósforo total entre estaciones.

PHOSPHORUS DISP

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	0.00054002	0.00054002	6.22	0.0163
Error	46	0.00399446	0.00008684		
Corrected Total	47	0.00453448			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PDISP Mean
0.119092	83.91973	0.009319	0.011104

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	0.00054002	0.00054002	6.22	0.0163

Anexo 33. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para el fósforo disponible entre estaciones.

The SAS System

The GLM Procedure 10.02 Martes, Diciembre 12, 2006 181

CHLOROPILL a

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	500.068852	500.068852	9.03	0.0043
Error	46	2546.393486	55.356380		
Corrected Total	47	3046.462338			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	CLOa Mean
0.164147	75.61550	7.440187	9.839500

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	500.0688521	500.0688521	9.03	0.0043

Anexo 34. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para la clorofila-a entre estaciones.

TURBIDITY

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	21.7284797	21.7284797	11.61	0.0014
Error	46	86.0950156	1.8716308		
Corrected Total	47	107.8234953			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	TURBIDEZ Mean
0.201519	48.47572	1.368076	2.822188

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	21.72847969	21.72847969	11.61	0.0014

Anexo 35. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para la turbidez entre estaciones.

The SAS System

The GLM Procedure 10.02 Martes, Diciembre 12, 2006 183

SOLID SUSP

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	4 8
Number of Observations Used	4 8

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	7.7924083	7.7924083	3.30	0.0757
Error	46	108.5805833	2.3604475		
Corrected Total	47	116.3729917			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	SOLIDOS Mean
0.066961	45.32636	1.536375	3.389583

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	7.79240833	7.79240833	3.30	0.0757

Anexo 36. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para los solidos suspendidos entre estaciones.

CHLOROPHYTA

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	901.333333	901.333333	7.04	0.0109
Error	46	5888.583333	128.012681		
Corrected Total	47	6789.916667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	clorofita Mean
0.132746	43.03367	11.31427	26.29167

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	901.333333	901.333333	7.04	0.0109

Anexo 37. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para Chlorophyta entre estaciones.

EUGLENOPHYTA

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	3451.02083	3451.02083	4.02	0.0509
Error	46	39490.95833	858.49909		
Corrected Total	47	42941.97917			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	eugleno Mean
0.080365	28.48709	29.30016	102.8542

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	3451.020833	3451.020833	4.02	0.0509

Anexo 38. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para Euglenophyta entre estaciones.

PYRROPHYTA

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1938.02083	1938.02083	4.40	0.0416
Error	46	20282.29167	440.91938		
Corrected Total	47	22220.31250			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pirro Mean
0.087218	27.38136	20.99808	76.68750

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	1938.020833	1938.020833	4.40	0.0416

Anexo 39. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para Pyrrophyta entre estaciones.

CYANOPHYTA

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	11.020833	11.020833	0.35	0.5585
Error	46	1459.458333	31.727355		
Corrected Total	47	1470.479167			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ciano Mean
0.007495	63.31845	5.632704	8.895833

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	11.02083333	11.02083333	0.35	0.5585

Anexo 40. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para el Cyanophyta entre estaciones.

BACILLARIOPHYTA

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1.3333333	1.3333333	0.17	0.6863
Error	46	371.3333333	8.0724638		
Corrected Total	47	372.6666667			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	bacio Mean
0.003578	77.48750	2.841208	3.666667

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	1.333333333	1.333333333	0.17	0.6863

Anexo 41. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para Bacillariphyta entre estaciones.

BACILLARIOPHYTA

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2
mes	12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
prof	2	0 1

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	712.416667	237.472222	2.10	0.1137
Error	44	4972.833333	113.018939		
Corrected Total	47	5685.250000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	criso Mean
0.125310	123.2584	10.63104	8.625000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
estacion	1	507.000000	507.000000	4.49	0.0399

Anexo 42. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para Crhysophyta entre estaciones.

The SAS System

The GLM Procedure 10.02 Martes, Diciembre 12, 2006 189

BACILLARIOPHYTA

Class Level Information		
Class	Levels	Values
estacion	2	1 2

Number of Observations Read	48
Number of Observations Used	48

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	26367.18750	26367.18750	26.28	<.0001
Error	46	46148.62500	1003.23098		
Corrected Total	47	72515.81250			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	total Mean
0.363606	13.98017	31.67382	226.5625

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Estacion	1	26367.18750	26367.18750	26.28	<.0001

Anexo 43. Estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) para el fitoplancton total entre estaciones.