

PROGRAMA DE ECOLOGÍA

ACTA DE EVALUACIÓN INTEGRAL DE PROYECTO DE GRADO

En Popayán a los 20 días del mes de abril de 2023, se reunió en esta Sede el Jurado Calificador, integrado por:

Blanca Bonilla y Luis Gerardo Chilito, para evaluar al estudiante de Ecología:

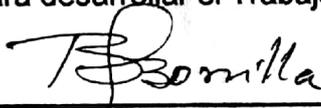
Daila Xilena Medina

El jurado evaluador atendiendo a los reglamentos del programa en Ecología y considerando que la estudiante ha demostrado suficiencia de conocimientos, capacidad analítica y deductiva, adaptación a situaciones nuevas, capacidad para la comunicación escrita y oral, aptitud para el desarrollo de investigaciones científicas y tecnológicas, le confiere la evaluación de:

ACEPTADO

REPROBADO

Para desarrollar el Trabajo de grado.



EVALUADOR 1
Blanca Bonilla



EVALUADOR 2
Luis Gerardo Chilito

**EL FITOPLANCTON COMO BIOINDICADOR DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN
DE LA LAGUNA SAN RAFAEL UBICADA EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL
PURACÉ**



**FUNDACIÓN
UNIVERSITARIA DE POPAYÁN**

DAILA XILENA MEDINA PEÑA

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DE POPAYÁN
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRARIAS
PROGRAMA DE ECOLOGÍA
POPAYÁN 2023**

**EL FITOPLANCTON COMO BIOINDICADOR DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN
DE LA LAGUNA SAN RAFAEL UBICADA EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL
PURACÉ**



**FUNDACIÓN
UNIVERSITARIA DE POPAYÁN**

DAILA XILENA MEDINA PEÑA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE ECÓLOGO

DIRECTORA: NICOLE IBAGÓN

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DE POPAYÁN

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRARIAS

PROGRAMA DE ECOLOGÍA

POPAYÁN 2023

Agradecimientos

En primer lugar a Dios por permitirme realizar este proyecto de investigación, y demostrarme su amor, en los momentos difíciles y ayudándome a tomar las mejores decisiones.

Agradezco a la Dr Nicole Estefania Ibagòn directora de la tesis, por su profesionalismo, la calidad humana y por su invaluable apoyo durante esta etapa de realización del proyecto.

A todas las personas que se encuentran vinculadas al proyecto “Línea base para el estado ecológico de los ecosistemas lenticos valor objeto de conservación del PNN Puracé – segunda fase”

A mi madre, por ser esa persona que siempre estuvo para apoyarme incondicionalmente, en todos los procesos de mi educación, por ser esa fuente de inspiración amor, confianza y sobre todo comprensión.

A mi hijo, quien me supo esperar, comprender y entender por la etapa que está atravesando, por ser mi inspiración.

A los docentes del programa de ecología que me formaron en esta hermosa área.

A mis compañeros de semestre que me han apoyado y motivado en este proceso.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre Ana Cecilia Peña por haberme forjado a ser la persona que hoy soy por su sacrificio y esfuerzo para brindarme la mejor educación, por creer en mis capacidades y apoyarme en cada proceso.

A mi hijo Santiago Medina, por ser mi principal fuente de motivación, inspiración y amor, para superarme cada día más y luchar por nuestro futuro.

A mi familia que ha sido una parte fundamental en mi aprendizaje y me forjaron a ser lo que hoy soy.

A mis amigos, pareja y compañeros, quienes me acompañaron y compartieron sus conocimientos y aprendizaje, a aquellas personas que durante todo este tiempo me apoyaron y celebraron conmigo cada logro.

Tabla de contenido

ARTÍCULO	1
Resumen.....	2
Abstract:	3
Introducción.....	3
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Área de estudio.....	5
Fase de campo	6
Fase de laboratorio.....	7
Parámetros fisicoquímicos.....	7
Fase de Análisis	7
Curva de acumulación	7
Índices de Diversidad.....	8
Índices limnológicos	8
Análisis fisicoquímicos –análisis de correspondencia canónica	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	9
Comunidad Fitoplanctónica	9
Índices limnológicos.....	12
Parámetros fisicoquímicos.....	13
DISCUSIÓN	15

Comunidad Fitoplanctónica	15
Parámetros fisicoquímicos.....	17
CONCLUSIONES.....	19
REFERENCIAS.....	20
ANEXOS	25

Lista de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica de la laguna San Rafael, Parque Nacional Natural Puracé.....	6
Figura 2 Densidad (cel/ml) de los grupos principales por mes de muestreo de fitoplancton en la laguna san rafael – parque nacional natural puracé...11	
Figura 3 Riquezas de especies por mes de muestreo de fitoplancton en la laguna san Rafael – parque nacional natural Puracé	11
Figura 4 Densidad (cel/ml) de las taxa principales por mes de muestreo de fitoplancton en la laguna san Rafael – parque nacional natural Puracé	11
Figura 5 Análisis de correspondencia canónica abundancia y variables climáticas.....	14

Lista de tablas

Tabla 1 Lista de fitoplancton y Variables fisicoquimicas para CCA	8
Tabla 2 Riqueza y abundancia general de fitoplancton por grupos taxonómicos para la laguna San Rafael – Parque Nacional Natural Puracé	10
Tabla 3 Índices de diversidad de fitoplancton en la laguna San Rafael – Parque Nacional Natural Puracé por los meses de estudio	12
Tabla 4 Índices de Nygaard de fitoplancton en la Laguna San Rafael – Parque Nacional Natural Puracé por los meses de estudio	12
Tabla 5 Parámetros químicos del fitoplancton en la Laguna San Rafael – Parque Nacional Natural Puracé.	13

ARTÍCULO

Trabajo de investigación presentado como opción de grado para el programa de pregrado en Ecología de la Fundación Universitaria de Popayán.

El documento a continuación sigue la guía de autores de la Revista Novedades Colombianas

El fitoplancton como bioindicador del estado de conservación de la Laguna San Rafael ubicada en el Parque Nacional Natural Puracé
Phytoplankton as a bioindicator of the conservation status of the San Rafael Lagoon located in the Puracé National Natural Park

Daila Xilena Medina Peña¹

Nicole Estefanía Ibagón²

Estudiante de ecología, tesista de la

¹Facultad de Ciencias Ambientales y Agrarias.

Fundación Universitaria de Popayán

E-mail: 080115da@gmail.com

²Bióloga Marina, docente del programa de ecología

Fundación Universitaria de Popayán

E-mail: nicole.ibagon@docente.fup.edu.co

Resumen

La Laguna San Rafael, ubicada en el Parque Nacional Natural Puracé, es un sitio sagrado y de valor de conservación para las comunidades indígenas. Con el objetivo de evaluar su estado de conservación, se realizó un estudio basado en la diversidad de fitoplancton presente en el agua. Se llevaron a cabo cuatro muestreos entre junio y octubre de 2022, filtrando 50 litros de agua a través de una red de plancton de 20 µm. Se determinó el número de especies utilizando una curva de acumulación de especies y se recopilieron datos fisicoquímicos in situ con una sonda digital. Se encontraron un total de 90 taxones de fitoplancton, agrupados en Bacillariophyta, Charophyta, Chlorophyta, Xanthophyta y Cyanobacteria. La especie más abundante fue *Melosira* sp. (Bacillariophyta). El ecosistema de la laguna se caracteriza como oligotrófico, con un pH promedio de 6.7, una concentración de oxígeno disuelto de 8.0 mg/L y una temperatura promedio de 13.8°C. Se observa una relación entre la altitud y el número de especies, habiéndose incrementado considerablemente en las últimas dos

décadas. Se sugiere que la alta diversidad de microalgas en la Laguna San Rafael se debe a la intensa luminosidad en las montañas de la región tropical.

Palabras clave: abundancia, Bacillariophyta, fitoplancton, microalgas.

Abstract:

The San Rafael Lagoon is part of the Puracé National Natural Park and is considered a conservation asset and a sacred place for indigenous communities. The water quality can be determined by assessing the diversity of phytoplankton, which are photosynthetic aquatic organisms found in the water column. The objective of this study was to evaluate the conservation status of the San Rafael Lagoon using the diversity of phytoplankton found. Four samplings were conducted in June, July, September, and October 2022, filtering 50 L of water through a 20 µm plankton net. The number of aliquots was determined using the species accumulation curve. Physicochemical data were collected in situ using a digital probe, with 60 aliquots reaching the asymptote of the species accumulation curve. The total richness was 90 taxa, distributed among five groups: Bacillariophytas, Charophyta, Chlorophyta, Xanthophyta, and Cyanobacteria. *Melosira* sp. (Bacillariophyta) was the most abundant species. The ecosystem is oligotrophic with an average pH of 6.7, dissolved oxygen of 8.0 mg/L, and an average temperature of 13.8°C. It is related to the altitude and species number, which has significantly increased in the last 20 years. The high diversity of microalgae in the San Rafael Lagoon is believed to be due to its intense luminosity in the mountains of the tropical region.

Keywords: abundance, Bacillariophyta, phytoplankton, microalgae.

Introducción

La alta montaña alberga una diversidad de ecosistemas que se extienden desde los 2,500 hasta los 5,000 metros sobre el nivel del mar. En esta franja altitudinal se

encuentran diferentes pisos bioclimáticos, como el andino, alto andino, paramo bajo, paramo propiamente dicho, súper paramo y glaciares o nevados (Flórez, et al, 2010). Los páramos son especialmente importantes debido a los servicios ecosistémicos que brindan, como la regulación y abastecimiento de agua, así como su valor cultural (Nieto, et al; 2015)

En Colombia, existen 37 complejos de paramos protegidos en áreas designadas como reservas naturales (Banco Mundial, 2021). Estos ecosistemas son fundamentales para el suministro de agua en los ríos, ya que contribuyen a los caudales ecológicos (Cabrera y Ramírez., 2014). Además, los páramos ofrecen hábitats para una amplia variedad de especies, permitiendo interacciones entre los componentes físicos y biológicos. Estas redes de interacciones involucran el agua, los suelos, la vegetación, los microorganismos, la fauna y las personas, formando la base del funcionamiento de los ecosistemas de alta montaña (Andinos; 2012). Dentro de los ecosistemas de paramo, se encuentran sistemas lagunares, como el que se localiza en el Parque Nacional Natural Puracé. Este sistema está compuesto por lagunas, entre las cuales se encuentra la laguna San Rafael o Andulbío, un área de conservación nacional. La gestión de esta laguna es llevada a cabo tanto por Parques Nacionales como por el Cabildo Indígena de Puracé, reconociendo su valor tanto en términos de servicios ecosistémicos como culturales (Parques Nacionales Naturales; 2019).

El fitoplancton, que consiste en microalgas fotosintéticas, desempeña un papel fundamental en los ecosistemas acuáticos y forma parte de la red trófica pelágica (Nuñez; 2008). Estas microalgas son consideradas productores primarios y su comunidad determina la dinámica de la red trófica, influyendo en los procesos biogeoquímicos del ecosistema (Hallegraeff, 2010). El estudio del fitoplancton en las lagunas de alta montaña, como la laguna San Rafael en el PNN Puracé, puede proporcionar información valiosa sobre la calidad del agua y las condiciones ambientales.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es evaluar el estado de conservación de la laguna San Rafael utilizando al fitoplancton como un bioindicador de la calidad del agua. Se analizará la diversidad del fitoplancton y su relación con las variables fisicoquímicas y climáticas en dos épocas diferentes durante el año 2022. Este estudio forma parte de un proyecto más amplio enfocado en establecer una “Línea base para el estado ecológico de los ecosistemas lenticos valor objeto de conservación del PNN Puracé – segunda fase” aprobado en la convocatoria 017 de “Proyecto Universidad Estado Empresa Sociedad” de la Fundación Universitaria de Popayán por medio de la Resolución 128 de 2021.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La laguna San Rafael se encuentra ubicada en las coordenadas 2°22'14,14"N 76°21'10,72"O, al nororiente del Parque Nacional Natural Puracé, cerca del resguardo indígena de Puracé, a una altitud aproximada de 3.300 metros sobre el nivel del mar. Tiene una superficie de alrededor de 16,78 hectáreas. Su principal afluente es la quebrada Chorrillos, y desde este ecosistema acuático nace el río Bedón, que forma parte de la cuenca alta del río Magdalena (Fig. 1). Debido a su cercanía a la ciudad de Popayán, se han realizado varios estudios sobre su diversidad ecosistémica (Donato, 2001; Modesto-Iregui et al., 2002; Martínez et al., 2009; Plaza-Ortega et al., 2017). La zona está rodeada por vegetación típica del páramo, como los frailejones (*Espeletia* spp.), chuscales (*Chusquea* spp.) y pajonales (*Calamagrostis* spp.) (Martínez et al., 2009).

Durante las visitas, se observó que hay poca intervención humana en el área, ya que no se evidencian actividades económicas directamente en el cuerpo de agua ni pisoteo, aunque hay informes de grupos de pescadores que frecuentan el lugar

en busca de trucha *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792).

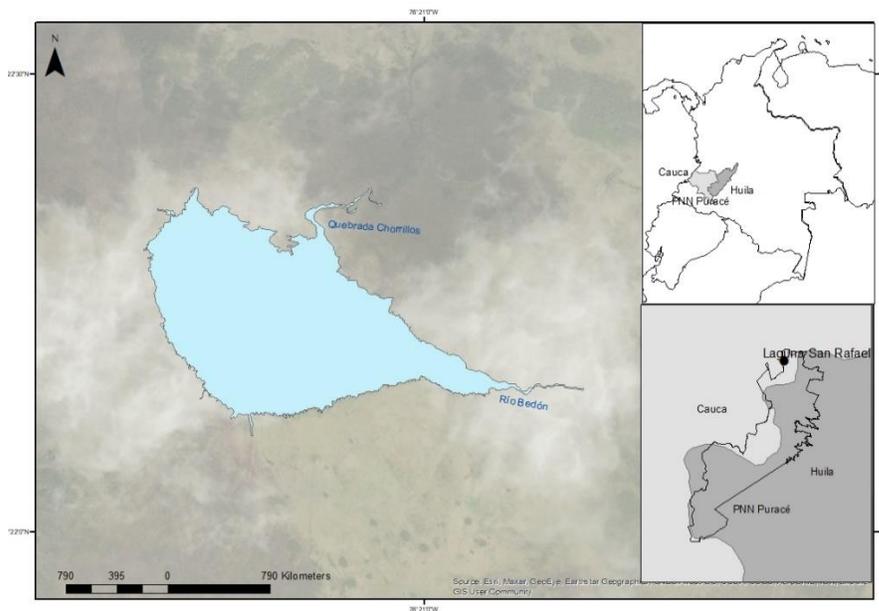


FIGURA 1: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA LAGUNA SAN RAFAEL, PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ. FUENTE: IBAGÓN N, 2023.

La laguna San Rafael experimenta cuatro estaciones climáticas, con dos periodos lluviosos de marzo a junio y de septiembre a diciembre, y dos periodos secos desde mediados de diciembre hasta marzo y desde finales de junio hasta principios de septiembre esta laguna es considerada como un sitio de valor cultural para la etnia Coconuco del resguardo Puracé, dentro de este ecosistema acuático se llevan a cabo rituales de refrescamiento (Parques Nacionales Naturales, 2019).

Fase de campo

Durante la fase de campo, se llevaron a cabo cuatro visitas a la laguna San Rafael con el propósito de recolectar muestras de fitoplancton. Estas visitas tuvieron lugar en distintos meses del año 2022, correspondiendo a diferentes periodos climáticos. En junio (M-1), se recogieron muestras durante el periodo de lluvia, en julio (M-2) y septiembre (M-3) durante el periodo seco, y en octubre (M-4) durante periodo de lluvia.

Las muestras de agua se obtuvieron en el borde de la laguna utilizando un balde de 10 litros y se filtraron 50 litros de agua a través de una red de plancton con una abertura de 20µm. Las muestras fueron envasadas en frascos de 500 ml y se preservaron in situ con una solución Transeau, compuesta por agua destilada, etanol al 90% y formol al 40%, en una proporción de 6:3:1.

Fase de laboratorio

En la fase de laboratorio, se empleó un microscopio Leica ICC 50 W. Se observó directamente la muestra en el microscopio con aumentos de 10X y 40X, realizando un barrido en zigzag y registrando cada individuo de las diferentes taxas encontradas. Se midió el volumen de la muestra utilizado en cada análisis para calcular las densidades de microalgas correspondientes (M-1= 209 ml, M-2= 192 ml, M-3= 184 ml, M-4= 201 ml).

La identificación de las diferentes taxas se llevó a cabo utilizando catálogos especializados, como los de Burgos y García (2007), Chivatá y Lopez (2014), Donato (2001), Dos Santos (2016), Núñez-Avellaneda (2008), Pinilla (2000) y Ramírez (2000). Además, se utilizó el Sistema de Información Taxonómica Integrado (ITIS, por sus siglas en inglés) para verificar la jerarquía taxonómica de cada género y confirmar su validez.

Parámetros fisicoquímicos.

Se tomaron mediciones de parámetros fisicoquímicos tanto in situ, utilizando una sonda multiparámetro HQ 40 de Hach, como ex situ en el laboratorio. Los parámetros analizados incluyeron pH (método SM 4500H+B), conductividad (método SM2510), oxígeno disuelto y temperatura. Además, se registraron datos de turbidez (método SM2130B), sólidos suspendidos totales (método SM2450D), nitritos (método 8507 HACH), nitratos (método 8171 HACH), fosfatos (método 8048 HACH) y nitrógeno amoniacal (método M62 Lovivond).

Fase de Análisis

Curva de acumulación

Se realizó una curva de acumulación por muestra para determinar la cantidad de alícuotas necesarias para describir la diversidad de las muestras. El objetivo era

identificar el punto de saturación o asíntota en la curva, que indica cuántas alícuotas son necesarias para obtener una representación adecuada de la diversidad del fitoplancton en la laguna.

Índices de Diversidad

Se utilizaron tres índices ampliamente reconocidos: el índice de diversidad de Shannon-Weaver (H), el índice de dominancia de Simpson (λ) y el índice de equidad de Pielou (J'). Estos índices proporcionan medidas cuantitativas y significativas de la riqueza de especies, dominancia relativa y equitatividad en la comunidad fitoplanctónica.

Índices limnológicos

Se calcularon diferentes índices limnológicos para evaluar el estado trófico de la laguna. Estos índices estaban relacionados con la presencia de diferentes grupos de fitoplancton. Por ejemplo, se calcularon índices específicos para cianofíceas, clorofíceas, diatomeas y euglenófitos, utilizando la relación entre el número de taxones de diferentes grupos de fitoplancton. También se calculó un índice compuesto que consideraba la presencia de múltiples grupos de fitoplancton.

$$\text{Índice para cianofíceas} = \frac{\text{numero de taxones de desmidiaceas}}{\text{numero de taxones de cianociceas}}$$

$$\text{Índice para Clorofíceas} = \frac{\text{numero de taxones de chlorococcales}}{\text{numero de taxones de desmidiaceas}}$$

$$\text{Índice para diatomeas} = \frac{\text{numero de taxones de diatomeas centricas}}{\text{numero de taxones de diatomeas pennales}}$$

$$\text{Índice para euglenofita} = \frac{\text{numero de taxones de euglenofitas}}{\text{numero de taxones de cianofíceas mas chlorococcales}}$$

$$\text{Índice compuesto} = \frac{\text{mas ditomeas centricas mas euglenofitas}}{\text{numero de taxones de desmidiaceas}}$$

Análisis fisicoquímicos –análisis de correspondencia canónica

Análisis de correspondencia canónica (CCA): Se realizó un análisis de correspondencia canónica para investigar la correlación entre las variables

fisicoquímicas del entorno y la abundancia del fitoplancton. Se seleccionaron 21 especies abundantes y 8 factores fisicoquímicos para este análisis. El objetivo era determinar cómo las variables fisicoquímicas influían en la distribución y abundancia del fitoplancton en la laguna.

TABLA 1
LISTA DE FITOPLANCTON Y VARIABLES FISICOQUÍMICAS PARA ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA

Especies		Variables fisicoquímicas.
Mel= <i>Melosira</i> sp	Tab= <i>Tabellaria</i> sp	pH
Eua= <i>Euastrum</i> sp	Nit= <i>Nitzschia</i> sp	C= conductividad
Tab 1= <i>Tabellaria</i> sp1	Nav= <i>Navicula</i> sp	=Temperatura
Clo= <i>Closterium</i> sp	Fra= <i>Fragilaria</i> sp	OD= Oxígeno Disuelto
Fra 1= <i>Fragilaria</i> sp1	Nit= <i>Nitzschia</i> sp1	TUR= turbiedad
Nav1= <i>Navicula</i> sp 1	Pin= <i>Pinnularia</i> sp	F= fosfatos
Gei= <i>Geitlerinema</i> sp	Sta= <i>Stauronneis</i> sp	SST= solidos suspendidos totales
Stau= <i>Staurastrum</i>	Clo1= <i>Closterium</i>	A= Alcalinidad
Cal= <i>Caloneis</i> sp	Osc= <i>Oscillatoria</i> sp	
Spi= <i>Spirogyra</i> sp,	Net= <i>Netrium</i> sp,	
Cos= <i>Cosmarium</i> sp	enc= <i>Encyonema</i> sp	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comunidad Fitoplanctónica

Los resultados obtenidos en el estudio de la comunidad fitoplanctónica de la Laguna San Rafael, en el Parque Nacional Natural Puracé, revelaron la presencia de 90 taxas diferentes en total. Estas taxas se distribuyeron en cinco phyla principales, siendo las Bacillariophyta (diatomeas) las más abundantes con 43

especies, seguidas de las Charophyta (algas verdes) con 26 especies.(tabla 2)

Las diatomeas también fueron el grupo más dominante en términos de densidad, con una media de 20,06 cel/mL, seguidas por las algas verdes con 4,37 cel/mL. La especie *Melosira* sp. Fue la más abundante a lo largo del monitoreo (fig.4).

Las *Nitzschia* sp (Bacillariophyta), *Tabellaria* sp. (Bacillariophyta) las cuales presentaron las mayores abundancias en el estudio (Anexo 2).

TABLA 2

RIQUEZA Y ABUNDANCIA GENERAL DE FITOPLANCTON POR GRUPOS TAXONÓMICOS PARA LA LAGUNA SAN RAFAEL – PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ

DIVISION	N=abundancia(cel/ mL)	S=riqueza (N.º de especies)
Bacillariophyta (Diatomea)	20,06	43
Charophyta (Alga verde)	4,37	26
Chlorophyta (Alga verde)	0,44	14
Cyanobacteria (Alga verde-azul)	0,85	6
Xanthophyta (alga verde)	0,003	1

Al analizar los resultados por meses, se observó que el mes M-4 presentó la mayor riqueza con 74 taxas, seguido por el mes M-2 con 71 taxa (tabla 2) En cuanto a la densidad, el mes M-3 registró la mayor cantidad de células por mililitro, con 9,35 cel/mL(fig.2) Las diatomeas dominaron en cada uno de los meses analizados, siendo la *Melosira* sp su especie dominante. .

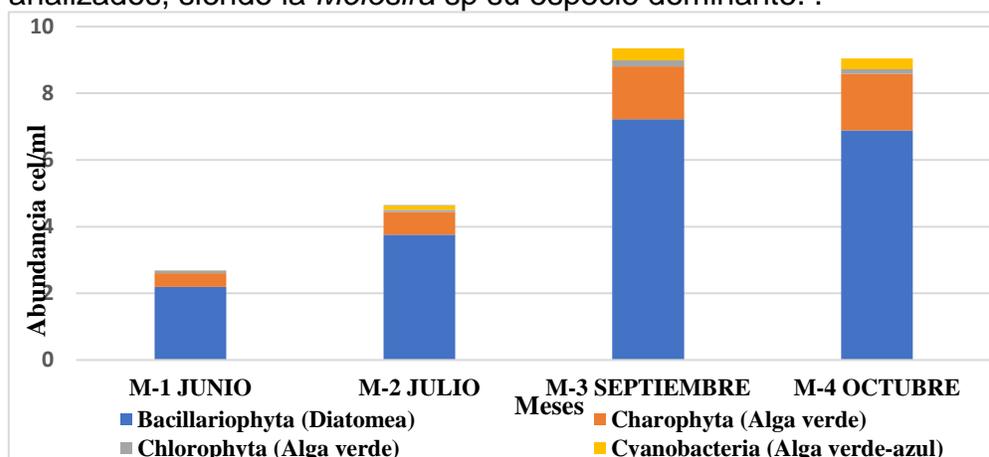


FIGURA 3 DENSIDAD (CEL/ML) DE LOS GRUPOS PRINCIPALES POR MES DE MUESTREO DE FITOPLANCTON EN LA LAGUNA SAN RAFAEL – PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ

Al observar el análisis por meses de la riqueza por divisiones taxonómicas se puede decir que el patrón es constante en todos los meses, siempre las Bacillariophyta (diatomeas) fueron dominantes, seguido por las Charophyta (algas verdes), y presentando menor riqueza la división Xanthophyta (alga verde). (Fig. 3).

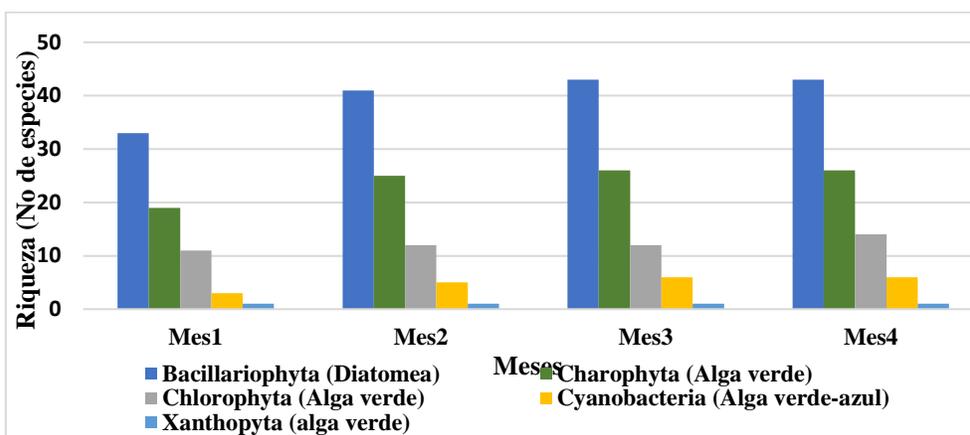


FIGURA 4 RIQUEZA DE ESPECIES POR MES DE MUESTREO DE FITOPLANCTON EN LA LAGUNA SAN RAFAEL – PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ

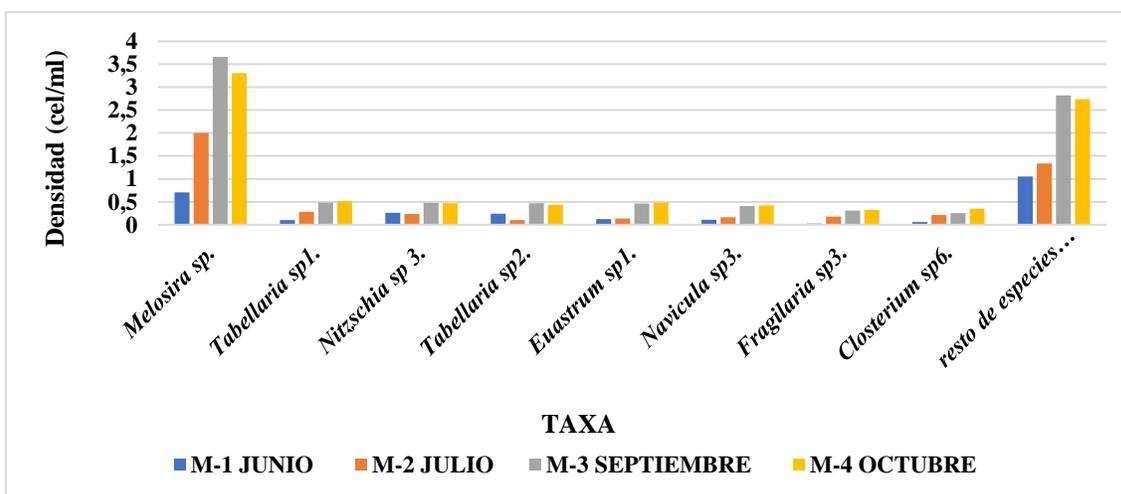


FIGURA 5 DENSIDAD (CEL/ML) DE LAS TAXA PRINCIPALES POR MES DE MUESTREO DE FITOPLANCTON EN LA LAGUNA SAN RAFAEL – PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ

El mes que exhibió la mayor riqueza en términos de diversidad de especies fue el M-4. Sin embargo, al analizar los demás índices de diversidad, se observa que el mes con la mayor diversidad fue el M-1, con un índice de diversidad (H') de 2,99. Además, este mes también presentó los valores más altos de equidad (J' = 0,71) y la menor dominancia (1-D = 0,10). En orden descendente, los meses que le siguieron en términos de diversidad fueron M-4, M-3 y M-2, respectivamente (Tabla 3).

TABLA 3
ÍNDICES DE DIVERSIDAD DE FITOPLANCTON EN LA LAGUNA SAN RAFAEL – PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ POR LOS MESES DE ESTUDIO

	M-1	M-2	M-3	M-4
Taxa_S	67	71	67	74
Individuals	3845	6904	13425	13570
Shannon_H	2,99	2,40	2,68	2,80
Simpson_1-D	0,89	0,77	0.82	0.84
Equitability_J	0,71	0,56	0.63	0.65
Porcentaje de densidad de <i>Melosira</i> sp.	26,19%	43,11%	39,14%	36,58%

Índices limnológicos

Los índices de Nygaard utilizados para estimar el estado trófico de la laguna indicaron que se encuentra en estado de oligotrofia en todos los meses, tanto según el índice de clorofíceas como el índice compuesto. El índice de diatomeas reveló que es un ambiente pobre en nutrientes. (Tabla 3).

TABLA 4
ÍNDICES DE NYGAARD DE FITOPLANCTON EN LA LAGUNA SAN RAFAEL – PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ POR LOS MESES DE ESTUDIO

Índices de Nygaard	M-1	M-2	M-3	M-4
	0,6	0,5	0,37	0,5
Índices para clorofíceas	Oligotrófico	Oligotrófico	Oligotrófico	Oligotrófico

Índices para diatomeas	0,2 Pobre en nutrientes	0,26 Pobre en nutrientes	0,28 Pobre en nutrientes	0,21 Pobre en nutrientes
Índice compuesto	1,05 Oligotrófico	1 Oligotrófico	1,05 Oligotrófico	1,1 Oligotrófico

Parámetros fisicoquímicos

En relación a los parámetros fisicoquímicos, se registraron temperaturas entre 13,2 y 15,8 °C, pH ácido con valores entre 6,46 y 6,93, oxígeno disuelto entre 7,88 y 8,1 mg/L, y conductividad entre 9,57 µS/cm y 26,05 µS/cm. La turbiedad fue baja en general. Los valores de nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos y fosfatos indicaron concentraciones bajas o indetectables en la laguna. (Tabla 4).

TABLA 5

PARÁMETROS QUÍMICOS DEL FITOPLANCTON EN LA LAGUNA SAN RAFAEL – PARQUE NACIONAL NATURAL PURACÉ.

Parámetros	M-1	M-2	M-3	M-4	Promedio
pH	6,5	6,9	6,9	6,5	6,7
Conductividad (µS/cm)	25,5	21,9	26,1	9,6	20,8
Oxígeno disuelto (mg/L)	7,9	8,1	8,0	8,0	8,0
Temperatura °C	13,0	13,0	15,8	13,3	13,8
Turbiedad UNT	3,8	1,9	1,9	1,3	2,2
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	0,021	<0,01	0,036	0,001	0,019
Nitratos (mg/L)	<0,1	0	0	0,3	0,1
Nitritos (mg/L)	< 0,002	0	0,002	1	0,33
Fosfatos (mg/L)	<0,02	0,35	0,16	0,07	0,19
Sólidos suspendidos totales	0,015	1	<1	<20	0,508
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)		5,4	10	4,3	6,6
DBO (mg/L)	<6,0	<6	8	<6	

El análisis de Componentes Canónicos (CCA) revela relaciones entre las especies y las variables fisicoquímicas. En el primer eje de análisis, se encontró una correlación positiva del 52,12%, mientras que en el segundo eje la correlación fue del 46,53%. En la gráfica de CCA, se puede observar que las variables que muestran una correlación positiva son el oxígeno disuelto, el pH y el fosfato, mientras que la turbiedad muestra una correlación negativa

En cuanto a las especies, se encontró una correlación positiva entre el fosfato y el oxígeno disuelto con la especie *Encyonema* sp. Kützing. Por otro lado, la alcalinidad y la temperatura se correlacionan negativamente con la especie *Oscillatoria* sp. Vaucher Ex Gomont, 1893. Además, la conductividad se correlaciona negativamente con *Nitzschia* sp1. Hassall.

Dentro de las especies que presentan una correlación positiva, se encuentran *Melosira* sp, *Tabellaria* sp, *Ehrenberg ex Kützin*, *Closterium* sp, *Nitzsch ex Ralfs* y *Pinnularia* sp Ehrenberg, además de la especie *Encyonema* sp. Estas relaciones sugieren que estas especies están influenciadas de manera similar por las variables fisicoquímicas mencionadas.

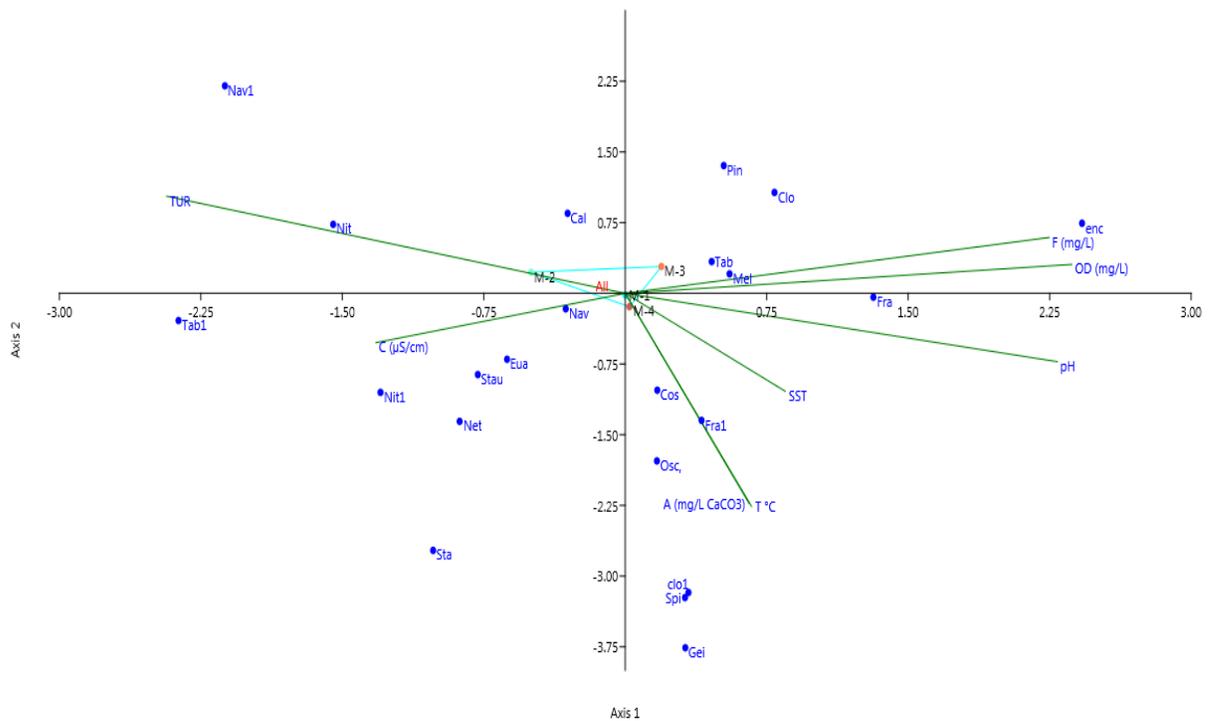


FIGURA 6 ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA CANÓNICA ABUNDANCIA Y VARIABLES CLIMÁTICA

DISCUSIÓN

Comunidad Fitoplanctónica

La laguna San Rafael, ubicada en el Parque Nacional Natural Puracé, ha experimentado un aumento en la abundancia y riqueza del fitoplancton en comparación con estudios anteriores realizados en 1992 y 2001 (Donato, 1992; 2001). Estos cambios pueden atribuirse a las modificaciones en las condiciones ambientales, como el aumento de la temperatura, las precipitaciones y los cambios en el uso del suelo (Zapata et al., 2021). Se plantea la posibilidad de que la presencia de truchas en la laguna San Rafael esté causando un efecto cascada, donde el consumo de peces en los macroinvertebrados y zooplancton podría desencadenar un afloramiento de fitoplancton (Herrera et al., 2017).

En comparación con otras lagunas del Parque Nacional Natural Puracé, la laguna San Rafael exhibe una mayor riqueza de fitoplancton. Por ejemplo, la laguna El Rebollero presenta 41 taxa, la laguna Magdalena 50 taxa, la laguna Santiago 56 taxa, la laguna Cusiyaco 44 taxa, la laguna Presentación 20 taxa y la laguna Larga 22 taxa (Donato, 2001). Estudios realizados en lagunas de alta montaña también muestran una menor diversidad de taxa. En la Sierra Nevada de Granada, España, a una altitud de 2,800-3,100 msnm, se encontraron un total de 36 taxa (Sánchez et al., 1989). En el lago Paione Superiore de los Alpes Centrales en Italia, ubicado a 2,269 msnm, se encontraron 18 taxa (Pugnetti y Bettinetti, 1999). Un estudio en el lago alpino Jingpo, en el noroeste de China, informó la presencia de 137 especies de fitoplancton, atribuido a una mayor precipitación y concentración de nutrientes (Cai et al., 2022). En México, se llevó a cabo un estudio en dos lagos de alta montaña ubicados a 4,200 msnm. El lago Sol presentó un total de 92 taxa, mientras que el lago Luna mostró 63 taxa. Aunque comparten origen, clima y régimen hídrico, estas lagunas difieren en tamaño, profundidad y presencia de vegetación bentónica, lo cual explica las diferencias en la presencia de taxa (Cuna et al., 2021). Además, se ha observado que la riqueza taxonómica del fitoplancton disminuye con la altitud y aumenta con la

conductividad, lo que implica que a mayor altitud hay menor cantidad de taxa (Barta et al., 2017).

La composición del fitoplancton en la laguna San Rafael está dominada por las algas diatomeas, un grupo cosmopolita que puede encontrarse en diversos ambientes húmedos (Blanco et al., 2010). Este grupo también prevalece en otras lagunas de alta montaña, como la laguna de Chingaza en Colombia (Donato, 1991), el embalse San Roque en Córdoba, Argentina (Daga et al., 2020), la laguna La Viuda en Lima, Perú (Huanaco et al., 2016) y en la laguna San Rafael en estudios anteriores (Donato, 2001; Modesto-Iregui et al., 2002).

La laguna San Rafael se encuentra en un estado oligotrófico, similar al que se evidenció en el estudio anterior realizado en el año 2001 (Donato, 2001). Este estado oligotrófico es común en lagunas de alta montaña, como la Laguna Cumbal en Colombia (Donato, 1991) y la laguna Soto en Argentina (Poi et al., 2016). La oligotrofia puede implicar una escasez de nutrientes, pero con un alto contenido de carbonatos, y puede encontrarse en diversos hábitats (Camacho et al., 2010).

Aunque el tamaño del cuerpo de agua se ha mantenido en 16,7 hectáreas desde 2014 (Plaza, 2014), es probable que durante la estación seca este se vea reducido, al igual que el volumen de agua de la laguna, lo cual podría resultar en un aumento de la concentración de nutrientes en el cuerpo de agua. Algunos autores que han medido previamente el tamaño del cuerpo de agua de la laguna reportaron una notable disminución del mismo. Por ejemplo, Yasnó et al. (2000) informó un área de 26,5 ha (citado por Joaquín, 2005); Donato (2001) reportó 20 ha; Muñoz (2008) informó un área aproximada de 18,9 ha, mientras que Imbachi (2014) mencionó un área de 15,7 ha.

La especie *Melosira* sp. (*M. Italica*) ha sido reportada en el fitoplancton de varias ubicaciones en Colombia, como Betania en Huila (Duque y Donato, 1988), Laguna de Fúquene, Chisacá de Boyacá Cundinamarca a una altitud de 2,540 msnm (Donato et al., 1987), Caño Choco en el departamento de Meta (Duque y Donato, 1992), y Ciénaga de San Antonio Magdalena (Osorio y Manjarres, 2015). Esta especie actúa como un indicador biológico de ambientes oligotróficos y baja

conductividad (Pinilla, 2000). La laguna San Rafael proporciona un entorno adecuado para esta especie, ya que es oligotrófica y tiene una baja conductividad. Para el año 2001, las especies dominantes en la laguna San Rafael fueron *Anabaena* sp. y también se observó una abundancia de *M. italica* (Donato, 2001). Según este estudio anterior, se puede decir que la especie *Melosira* sp. mantiene su dominancia, aunque la dominancia de *Anabaena* sp. ha disminuido. *Melosira* sp. es característica de sistemas turbulentos y sujetos a cambios en la calidad de la luz debido a los movimientos a lo largo del gradiente lumínico (De León et al., 2003). Sin embargo, las muestras se recolectaron solo en el borde de la laguna y no se tomaron muestras a diferentes profundidades para evaluar el impacto de la penetración de la luz en la columna de agua.

Parámetros fisicoquímicos

Al analizar los parámetros fisicoquímicos de la Laguna San Rafael en este estudio se puede decir que su temperatura ha aumentado en comparación de hace 20 años que fue cuando se publicó el trabajo realizado por Donato (2001), debido a que en esa época su temperatura se encontraba entre 9,06 – 10,2 °C y en 2022 se encuentra entre los 13° - 15 °C, se evidencia temperatura similar a la registrada por Imbachi (2014) de 15,2°C, pero Plazas (2014) evidencio temperaturas en época seca de 11,6° -19,5°C, Demostrando que el cambio climático está afectando estos ecosistemas de alta montaña debido a que el calentamiento global, ha provocado un aumento en la temperatura, afectando a este ecosistema y a los organismos que habitan, por ejemplo el fitoplancton puede tener consecuencias negativas ya que muchas especies son sensibles a los cambios bruscos de la temperatura y de las variables fisicoquímicas como el pH.

La temperatura de los ambientes de alta montaña puede aumentar entre 0,1-0,2 °C (Pabón-Caicedo; 2012) y esto puede generar que muchos lagos lleguen a temperaturas de 20°, lo que puede ser fatal para los organismos debido a que las temperaturas altas, aceleran su metabolismo, aumentando la demanda de oxígeno, volviéndose así estos lagos como lagos tropicales (Solorza, 2018; Zapata et al, 2021). Al presentarse este aumento de temperatura, las lagunas y en general

los ecosistemas de páramos andinos se encontrarían vulnerables por el desequilibrio ecológico que se genera podría cambiar radicalmente el paisaje pasando de páramo a bosque (Romero y Castro, 2011). Se ha demostrado que el cambio climático, presenta cambios drásticos en la composición de microalgas (diatomeas) en lagos andinos (Michelutti, et al., 2015).

Un estudio realizado en los Alpes suizos tuvo como resultado que el aumento de la temperatura del agua resultó en cambios significativos en la composición del fitoplancton, como lo es la disminución de especies que son sensibles al calor y el debido aumento de especies que toleran el aumento del calor (Anneville et al., 2005). En otro estudio en los Andes peruanos también se registró un aumento de la temperatura del agua y la disminución de las precipitaciones afectaron negativamente la abundancia y la diversidad del fitoplancton en las lagunas de alta montaña (Sommaruga et al., 2010) Aunque debido al aumento de la temperatura en la laguna San Rafael desde 2001 (Donato; 2001) se esperaba un aumento en el pH (Koinig et al; 1998); este presentó una disminución de 7,2 en 2001 a 6,7 en 2022, similar a los reportados por Plazas, (2014) de 6,17 e Imbachi, (2014) de 6,5. Este parámetro se correlaciona positivamente con la composición de las especies en la laguna. La geomorfología y el sustrato de la laguna; también puede afectar al pH si son ambientes de origen glaciar tienden a presentar estos valores bajos de pH (Criales et al; 2020). La abundancia de diatomeas ha sido relacionada en lagos andinos de Colombia con factores como la acidez del agua (Muñoz y Rivera; 2022).

En el análisis de correspondencia canónica, se ha encontrado una correlación positiva entre el fosfato y el oxígeno disuelto con la composición de especies en la laguna. Los valores de oxígeno disuelto presentados por la laguna San Rafael son muy similares a los estudios anteriores en el mismo lugar (Donato, 2001). El oxígeno disuelto fue de 8,7 mg/L, y este valor puede deberse a la ubicación de la laguna, ya que está expuesta a fuertes vientos (Donato, 1991; Rivera, 2005). Tanto el fosfato como el nitrógeno influyen en la composición de las diatomeas

(Muñoz y Rivera, 2022). Es importante destacar que muchas de las lagunas de alta montaña se encuentran en cuencas de rocas cristalinas con lenta meteorización química.

CONCLUSIONES

La diversidad del fitoplancton registrado dentro de la laguna San Rafael, es un indicador de que el ecosistema acuático, se encuentre en una buena calidad, gracias a la presencia de las diferentes especies y de la especie *Melosira* sp. Que por su distribución y abundancia están dando a conocer que las condiciones ambientales son buenas.

Se pudo observar una relación significativa entre las variables fisicoquímicas y la diversidad de fitoplancton se correlación de manera positiva con varias especies, pero también presentan una correlación negativa de esta manera teniendo un equilibrio en el ecosistema acuático.

Las variables climáticas. Han demostrado tener un efecto significativo en la diversidad fitoplanctónica, debido a que los cambios en la temperatura ha traído consigo que especies resistentes a estas alteraciones se mantengan presente, como es el caso de las diatomeas.

En conclusión, el análisis de la diversidad del fitoplancton en la laguna San Rafael proporcionó información valiosa sobre la calidad del agua y los posibles impactos ambientales. Se encontró una relación significativa entre las variables fisicoquímicas y la diversidad del fitoplancton, lo que destaca la importancia de monitorear y mantener un equilibrio en los niveles de nutrientes. Además, se identificó la influencia de las variables climáticas en la diversidad fitoplanctónica, resaltando la importancia de considerar los efectos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos. Estos hallazgos pueden ser utilizados para implementar estrategias de gestión y conservación adecuadas para mantener la salud y la biodiversidad de la laguna San Rafael.

REFERENCIAS

- Andinos, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. Autores:(Luis Ll., Alejandra S., Rolando C., Bert De B., Boris O. and Pablo B. Ecuador. Pág. 238, 239. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56475.pdf>
- Anneville, O., Gammeter, S., & Straile, D. (2005). Phosphorus decrease and climate variability: mediators of synchrony in phytoplankton changes among European peri-alpine lakes. *Freshwater Biology*, 50(10), 1731-1746.
- Banco Mundial. 2021. Delimitación y protección de los 37 páramos de Colombia. World Bank.14 pp
- Barta, B., Mouillet, C., Espinosa, R. et al. Glacial-fed and páramo lake ecosystems in the tropical high Andes. *Hydrobiologia* **813**, 19–32 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s10750-017-3428-4>
- Blanco Lanza, S., Álvarez Blanco, I., Cejudo Figueiras, C., Bécares Mantecón, E., Ector, L., García
- Burgos, M. D., and García, E. (2007). Atlas de Microorganismos presentes en los humedales Andaluces. Consejo del Medio Ambiente, Junta de Andalucía, España. 251 pp
- Cabrera, M. and W. Ramírez (Eds). 2014. Restauración ecológica de los páramos de Colombia Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt 296 pp. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31451>
- Cai, Y.; Qi, L.; Shan, T.; Liu, Y.; Zhang, N.; Lu, X.; Fan, Y. Application of Phytoplankton Taxonomic -Diversity Indices to Assess Trophic States in Barrier

Lake: A Case of Jingpo Lake. *Diversity* 2022, 14, 1003.

<https://doi.org/10.3390/d14111003>

Camacho, A., Borja, C., Valero-Garcés, B., Sahuquillo, M., Cirujano, S., Soria, J., Rico E., de la Hera A., Santamans, A., García, A. Chicote, A., and Gosálvez, R. (2010) aguas oligo-mesotróficas calcáreas con vegetación de Chara spp. . En: Chivatá, J and López L. (2014) Cartilla Ilustrada Fitoplancton y Zooplancton Humedal Córdoba. Bogotá D.C. 39 pp

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales, 2018 ISBN recurso electrónico: 978-958-8901-84-8 76 pp

<https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/guia-nacional-para-la-modelacion-recurso-hidrico-superficial-continental/>

Criales-Hernández, M.I. Sanchez-Lobo, D.M., & Almeyda Osorio, J.K. (2020). Expanding the knowledge of plankton diversity of tropical lakes from the Northeast Colombian Andes. *Revista de Biología Tropical*, 68(Suppl. 2), S159-S176. doi.org/10.15517/rbt.v68is2.44347

Cuna, E., Caballero, M., Zawisza, E., and Ruiz, C. (2015). Historia ambiental de un lago alpino en el centro de México. *Revista Especializada en Ciencias Químico Biológicas*, 18(2):97-106. doi.org/10.1016/j.recqb.2015.09.001

Cuna E, Alcocer J, Gaytán M, Caballero M. Biodiversidad del fitoplancton en dos lagos tropicales de alta montaña en el centro de México. *Diversidad* 2022; 14(1):42. doi.org/10.3390/d14010042

Daga, I. C., Fernández Belmonte, M. C. and Reyna, S. M. (2020). Composición algal y bioindicadores de calidad de agua. Caso de estudio: Embalse San Roque, Córdoba. Argentina. *Cuadernos del Curiham*. 26: 1-11. doi.org/10.35305/curiham.v26i0.143

De León, L., and Chalar, G. (2003). Abundancia y diversidad del fitoplancton en el Embalse de Salto Grande (Argentina Uruguay). Ciclo estacional y distribución espacial. *Limnetica*, vol 22(1-2), 103-113. doi.org/10.23818/limn.22.07

Donato R., J. C. (1991). Fitoplancton y aspectos físicos y químicos de la laguna de Chingaza en Cundinamarca, Colombia. *Caldasia*, 16(79), 489–500.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/35656/36203>

Donato, J., Duque, S., Mora, E., and Osejo, L. (1987). Estructura y dinámica del fitoplancton de la Laguna de Fúquene (Cundinamarca, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas y Naturales*, 16(62), 113-144.

<https://www.jstor.org/stable/23641387>

Donato-Rondón, J. C. (2001). Fitoplancton de los lagos andinos del norte de Sudamérica (Colombia): Composición y factores de distribución. ISBN: 958-9205-

45-3 232 pp <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/47>

Dos Santos, R. Melissa. (2006) Atlas: Algas del Paraguay Características e Importancia, Muestreo en Paraguay Clave de Identificación e Ilustraciones FACEN, 234 pp <https://revistabioika.org/es/entrevista/post?id=117#!>

Duque, S., and Donato, J. (1992). Biología y ecología del fitoplancton de las aguas dulces en Colombia. *Cuadernos divulgativos*, 35, 1-21.

Duque, S., and Donato, J. C. (1988). Estudio del fitoplancton durante las primeras etapas de llenado del embalse de la central hidroeléctrica de Betania, Huila Colombia. *Universitas Scientiarum*, 1(2), 29-52.

<https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/scientarium/article/view/5090>

Flórez, A., Barajas, A. F., Jaramillo, O., Martínez, N. J., Barrera, M. S., and Montoya, J. W. (2010). *Sistemas morfogénicos del territorio colombiano*. Bogotá: IDEAM.

http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021769/Sistemas_morf_Territ_Col_Ideam_Contenido.pdf

Hallegraeff, G. M. (2010). Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge 1. *Journal of phycology*, 46(2), 220-235. doi.org/10.1111/j.1529-8817.2010.00815.x

Herrera-Martínez, Y., Paggi, J. C., and García, C. B. (2017). Cascading effect of exotic fish fry on plankton community in a tropical Andean high mountain lake: a

mesocosm experiment. *Journal of Limnology*, 76(2), 397-408.

doi.org/10.4081/jlimnol.2017.1488

Huanaco, J. L., Montoya Terreros, H., Castellanos Sánchez, P. L., and Quiroz Barraza, R. A. (2018). Evaluación de la diversidad del fitoplancton de la laguna La Viuda (Lima, Perú) en agosto-noviembre 2016. *Arnaldoa*, 25(3), 1027-1040.

doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25314

Imbachi, D. (2014). Integridad ecológica de la laguna San Rafael Parque Nacional Natural Puracé, Cauca. *Biólogo, Universidad del Cauca, Popayán*.

Joaqui, SC (2005). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales para ecotopos paramunos caracterizando las intervenciones antrópicas, en una ventana del Parque Nacional Natural Puracé (Trabajo de grado), Universidad del Cauca, Popayán,

Koinig, K. A., Schmidt, R., Sommaruga-Wögrath, S., Tessadri, R., and Psenner, R. (1998). Climate change as the primary cause for pH shifts in a high alpine lake. *Water, Air, and Soil Pollution*, 104, 167-180.

<https://doi.org/10.1023/A:1004941013924>

Martínez, J., Figueroa, A., and Ramírez, B. (2009). Cambios de cobertura y fragmentación a través de un análisis espacio temporal en el Parque Nacional Natural Puracé. *Fragmentación y coberturas vegetales en ecosistemas andinos, departamento del Cauca*, 137-155.

Michelutti N, Wolfe AP, Cooke CA, Hobbs WO, Vuille M, Smol JP (2015) Climate Change Forces New Ecological States in Tropical Andean Lakes. *PLoS ONE* 10(2): e0115338. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115338>

Modesto -Iregui, M., Guillot, G., and Donato, J. C. (2002). Dimensión fractal y relación área superficial/volumen de algas del fitoplancton de lagos colombianos. *Caldasia*, 24(1), 121-134.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/73138>

Montoya M, Y. and Aguirre R., N. (2013). Dinámica fisicoquímica de las aguas de un sistema de planicies inundables tropicales. *Revista Facultad de Ingeniería*

Universidad de Antioquia, (69), 256-273.

<https://www.redalyc.org/pdf/430/43029812020.pdf>

Montoya-Moreno, Y., & Aguirre-Ramírez, N. (2008). Asociación de algas perifíticas en raíces de macrófitas en una ciénaga tropical colombiana. *Hidrobiológica*, 18 (3), 189-197. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57822408002>

Muñoz, F. (2008). Caracterización biofísica, análisis espacio temporal y de erupción antrópica, para humedales alto andinos, caso tipo laguna de San Rafael (Zona Norte) Parque Nacional Natural Puracé y Humedal de Calvache (Tesis de Pregrado), Universidad del Cauca, Popayán-Cauca

Muñoz-López, C.L., Rivera-Rondón, C.A. (2022). Diatom response to environmental gradients in the high mountain lakes of the Colombia's Eastern Range. *Aquat Sci* **84**, 15. <https://doi.org/10.1007/s00027-021-00838-z>

Nieto, M., Cardona, L. and Agudelo, C. (2015). Análisis de servicios ecosistémicos. Provisión y regulación hídrica. En: Ungar, P. (ed.) (2015 ISBN 978-958-8889-49-8 96pp <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9296>

R.Duque, S., & NúñezAvellaneda, M. (2000). Microalgas Acuáticas de la Amazonía Colombiana. *Biota Colombiana*, 1 (2), 208-216.

<https://www.redalyc.org/pdf/491/49110203.pdf>

Osorio-Ávila, F. J., and Manjarres-García, G. A. (2015). Ficoperifiton asociado a macrófitas en la ciénaga Cerro de San Antonio, Magdalena-Colombia. *Intropica*, 10(1), 74–83.

<https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/1649>

Pabón Caicedo, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139), 261-278

Pinilla, G. (2000). Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano. 67pp

Pla, L., (2006). Biodiversidad: inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia* 31 (8), 583-590.

<https://www.redalyc.org/pdf/339/33911906.pdf>

Parques Nacionales Naturales. 2019. Plan de manejo ambiental Parque Nacional Natural Puracé 2020-2024. 180 p.

Plaza-Ortega, V., Valencia-Rojas, M. P., and Figueroa-Casas, A. (2017).

Aplicación del índice integrado relativo de antropización (INRA), en un ecosistema de alta montaña. *Luna Azul*, (44), 80-93.

<https://www.redalyc.org/journal/3217/321750362006/html/>

Plaza, V. (2014). Alteraciones antrópicas en el sistema lagunar San Rafael (Parque Nacional Natural Puracé) a través de tres subdivisiones de hábitat (Trabajo de grado), Universidad del Cauca, Popayán

Poi, ASG, Casco, SL, Neiff, JJ, Carnevali, RP y Gallardo, LI (2016). Lagunas periurbanas de Corrientes Argentina: de la mesotrofia a la eutrofia un camino de ida y vuelta en 20 años. *Biología acuática* 31: 1 – 9

<http://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/30708>

Pugnetti, A., and Bettinetti, R. (1999). Biomass and species structure of the phytoplankton of an high mountain lake (Lake Paione Superiore, Central Alps, Italy). *Journal of Limnology*, 58(2), 127-130.

<https://doi.org/10.4081/jlimnol.1999.127>

Ramirez Restrepo J. J. (2000). Fitoplancton de agua dulce: aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios (No. 589.4 R1481f Ej. 1 019715). Editorial Universidad de Antioquia,

Ramírez, J.J. 2000. Variación diurna y estacional del contenido calórico, la estabilidad y el trabajo del viento en una laguna tropical. *Acta Limnol. Bras.* 12: 39-54. <https://hdl.handle.net/10495/20586>

Rivera-R, C., Solano-M, D., Zapata-A, A., and Donato-R, J. (2005). Phytoplankton diversity in a tropical high mountain lake. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 29(1), 418-421

<https://doi.org/10.1080/03680770.2005.11902046>

Romero, J. A., and Castro, L. A. P. (2011). Siecha un bioma mágico que puede sufrir perturbaciones locales de origen biótico. *CapyCua*, 5(1), 2.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4020219>

Sánchez Castillo, P.M., L. Cruz-Pizarro and P. Carrillo.(1989). Caracterización del fitoplancton de las lagunas de alta montaña de sierra nevada (Granada, España) en relación con las características fisico-químicas del medio. *Limnetica*-5-1-p-37

<https://www.limnetica.com/documentos/limnetica/limnetica-5-1-p-37.pdf>

Solorza-Bejarano, J. (Ed.). (2018). *Ecología y cambio climático en ecosistemas de alta montaña en Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. 68 p.

Sommaruga, R., Casamayor, E. O., & García, J. C. (2010). Inhibition of the growth of toxic *Planktothrix* spp. and filamentous non-toxic cyanobacteria by light and temperature. *FEMS microbiology ecology*, 73(2), 261-268.

Zapata, A.; Rivera-Rondón, C.A.; Valoyes, D.; Muñoz-López, C.L.; Mejía-Rocha, M.; Catalan, J. (2021). Páramo Lakes of Colombia: An Overview of Their Geographical Distribution and Physicochemical Characteristics. *Water*, 13, 217

ANEXOS

DIVISION	Especies	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Cel/ml
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Melosira</i> sp.	0,702936667	2,00064	3,662376667	3,30779	9,67374333
Charophyta (Alga verde)	<i>Nitzschia</i> sp3.	0,261946667	0,23424	0,479306667	0,46967	1,44516333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Tabellaria</i> sp2.	0,243136667	0,1024	0,46816	0,43751	1,25120667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Navicula</i> sp1.	0,164413333	0,14912	0,169986667	0,18224	0,66576
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Euastrum</i> sp1.	0,120523333	0,13376	0,460496667	0,48642	1,2012
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Navicula</i> sp3.	0,110073333	0,1664	0,406853333	0,41741	1,10073667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Tabellaria</i> sp1.	0,1045	0,27968	0,485576667	0,50786	1,37761667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Colonia</i> sp1.	0,07106	0,1536	0,075936667	0,04154	0,34213667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Navicula</i> sp2.	0,066183333	0,01152	0,00836	0,00804	0,09410333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Closterium</i> sp6.	0,062003333	0,21248	0,25707	0,35242	0,88397333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Cosmarium</i> sp1.	0,062003333	0,01216	0	0	0,07416333
Charophyta (Alga verde)	<i>Pinnularia</i> sp4.	0,06061	0,00064	0,06061	0,05829	0,18015
Charophyta (Alga verde)	<i>Pinnularia</i> sp2.	0,057823333	0,15488	0,187403333	0,16616	0,56626667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Nitzschia</i> sp1.	0,055733333	0,032	0,17765	0,20971	0,47509333
Cyanobacteria (alga verde-azul)	<i>Skeletonema</i> sp2.	0,053643333	0,01024	0,017416667	0,00871	0,09001
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Staurastrum</i> sp3.	0,04389	0,04288	0,1672	0,12864	0,38261
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Caloneis</i> sp.	0,043193333	0,07232	0,113556667	0,12462	0,35369

Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Aulacoseria</i> sp1.	0,02926	0,0064	0	0	0,03566
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Asterionella</i> sp	0,02508	0,00576	0,00209	0,00201	0,03494
Cyanobacteria (alga verde-azul)	<i>Fragilaria</i> sp3.	0,023686667	0,17536	0,312106667	0,32227	0,83342333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Fragilaria</i> sp2.	0,0209	0,05696	0,21318	0,22043	0,51147
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Staurastrum</i> sp2.	0,018113333	0,01024	0	0	0,02835333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Stauronneis</i> sp.	0,017416667	0,02752	0,169986667	0,14204	0,35696333
Charophyta (Alga verde)	<i>Netrium</i> sp1	0,017416667	0,01216	0,07315	0,08978	0,19250667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Fragilaria</i> sp1.	0,015326667	0,04032	0,053643333	0,06097	0,17026
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Cosmarium</i> sp2.	0,013236667	0,00192	0,006966667	0,00804	0,03016333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Closterium</i> sp2.	0,01254	0,00128	0	0	0,01382
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Cosmarium</i> sp3.	0,01254	0,0256	0,08569	0,07705	0,20088
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Pediastrum</i> sp.	0,01254	0,03072	0,130276667	0,06097	0,23450667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Cerataulina</i> sp	0,011843333	0,0032	0	0	0,01504333
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Asterococcus</i> sp1.	0,011146667	0,00064	0,009056667	0,0067	0,02754333
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Chlorella</i> sp.	0,011146667	0	0	0	0,01114667
Cyanobacteria (alga verde-azul)	<i>Oscillatoria</i> sp.	0,011146667	0,02176	0,113556667	0,11524	0,26170333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Synedra</i> sp.	0,01045	0,00128	0,003483333	0,00335	0,01856333
Charophyta (Alga verde)	<i>Microspora</i> sp1.	0,009753333	0,016	0,00209	0,00335	0,03119333
Cyanobacteria (alga verde-azul)	<i>Mougeotia</i> sp.	0,009056667	0	0,005573333	0,01541	0,03004
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Scenedesmus</i> sp.	0,00836	0,00256	0	0,00201	0,01293

Cyanobacteria (alga verde-azul)	<i>Spyrogyra</i> sp2.	0,007663333	0,00768	0,03971	0,03082	0,08587333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Diatoma</i> sp.	0,006966667	0	0	0,00067	0,00763667
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Euastrum</i> sp2.	0,006966667	0,0064	0,034833333	0,03015	0,07835
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Aulacoseria</i> sp2.	0,00627	0,00192	0,00209	0,00201	0,01229
Charophyta (Alga verde)	<i>Oocystis</i> sp2.	0,005573333	0,00256	0,003483333	0,0067	0,01831667
Charophyta (Alga verde)	<i>Pinnularia</i> sp1.	0,005573333	0	0	0	0,00557333
Charophyta (Alga verde)	<i>Surirella</i> sp.	0,005573333	0,00448	0,009753333	0,00938	0,02918667
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Closterium</i> sp1.	0,004876667	0,00128	0,000696667	0	0,00685333
Charophyta (Alga verde)	<i>Fragilaria</i> sp4.	0,004876667	0	0	0,00268	0,00755667
Charophyta (Alga verde)	<i>Pinnularia</i> sp3.	0,004876667	0,00128	0,004876667	0,00268	0,01371333
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Ankyra</i> sp	0,00418	0	0	0	0,00418
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Closterium</i> sp5.	0,00418	0	0	0	0,00418
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Hyalotheca</i> sp.	0,00418	0,15424	0,034136667	0,04757	0,24012667
Charophyta (Alga verde)	<i>Skeletonema</i> sp1.	0,003483333	0	0,00418	0,00402	0,01168333
Charophyta (Alga verde)	<i>Spirogyra</i> sp1.	0,003483333	0,00704	0,126793333	0,09447	0,23178667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Colonia</i> sp2.	0,00209	0,00064	0	0	0,00273
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Cymbella</i> sp.	0,00209	0	0	0,00134	0,00343
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Geitlerinema</i> sp.	0,00209	0,00256	0,212483333	0,15075	0,36788333
Charophyta (Alga verde)	<i>Oocystis</i> sp3.	0,00209	0,00512	0,017416667	0,01943	0,04405667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Spondylosium</i> sp.	0,00209	0,00256	0	0	0,00465

Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Thalassionema</i> sp.	0,00209	0,00512	0	0	0,00721
Cyanobacteria (Alga verde-azul)	<i>Aphanothece</i> sp.	0,001393333	0	0	0	0,001393333
Xanthopyta (alga verde)	<i>Botrydiopsis</i> sp.	0,001393333	0,00128	0	0	0,002673333
Charophyta (Alga verde)	<i>Netrium</i> sp2.	0,001393333	0,00192	0,002786667	0,00469	0,01079
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Asterococcus</i> sp2.	0,000696667	0,00512	0,000696667	0,00067	0,007183333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Brachysira</i> sp.	0,000696667	0	0	0	0,000696667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Closterium</i> sp3.	0,000696667	0,00832	0,07315	0,04757	0,12973667
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Microspora</i> sp2.	0,000696667	0	0	0	0,000696667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Planktosphaeria</i> sp	0,000696667	0	0,011146667	0,01474	0,026583333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Amphora</i> sp	0	0,00128	0	0,00804	0,00932
Cyanobacteria (alga verde-azul)	<i>Anabaena</i> sp	0	0	0,00418	0,00804	0,01222
Charophyta (Alga verde)	<i>Bulbochaete</i> sp	0	0,01984	0,000696667	0,000696667	0,021233333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Chaetoceros</i> sp.	0	0	0,005573333	0,01809	0,023663333
Chlorophyta (Alga verde)	<i>closterium</i> sp4.	0	0,00832	0,107286667	0,1407	0,25630667
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Cocconeis</i> sp1.	0	0,02176	0,013933333	0,01474	0,050433333
Charophyta (Alga verde)	<i>Cymatopleura</i> sp.	0	0,00256	0,00209	0,00402	0,00867
Charophyta (Alga verde)	<i>Desmidium</i> sp.	0	0	0,015326667	0,01943	0,03475667
Charophyta (Alga verde)	<i>Encyonema</i> sp.	0	0,016	0,093353333	0,07035	0,179703333
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Eunotia</i> sp.	0	0,01024	0,001393333	0,00938	0,021013333
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Gloeocystis</i> sp.	0	0	0	0,00603	0,00603

Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Micrasterias</i> sp.	0	0	0	0,00402	0,00402
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Nitzschia</i> sp2.	0	0,00128	0,011146667	0,01474	0,02716667
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Nostoc</i> sp	0	0	0,03553	0,03886	0,07439
Charophyta (Alga verde)	<i>Oocystis</i> sp1.	0	0,00064	0	0,01206	0,0127
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Pleurotaenium</i> sp.	0	0,00256	0,02299	0,03752	0,06307
Chlorophyta (Alga verde)	<i>Rhopalodia</i> sp.	0	0	0,00209	0,0067	0,00879
Charophyta (Alga verde)	<i>Sellaphora</i> sp.	0	0,00128	0,00209	0,00804	0,01141
Charophyta (Alga verde)	<i>Sirogonium</i> sp.	0	0,00384	0,000696667	0,01072	0,01525667
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Sphaerocystis</i> sp.	0	0,07616	0	0	0,07616
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Staurastrum</i> sp4.	0	0	0,06897	0,05494	0,12391
Charophyta (Alga verde)	<i>Thalassionema</i> sp.	0	0,00448	0,004876667	0,01675	0,02610667
Charophyta (Alga verde)	<i>Spirulina</i> sp.		0,04032	0,00418	0,01407	0,05857
Bacillariophyta (Diatomea)	<i>Staurastrum</i> sp 1.		0,00256	0,001393333	0,01675	0,02070333