

# Análisis multivariante de comunidades planctónicas con relación a variables ambientales en sistemas piscícolas amazónicas ecuatorianas

Leo Rodríguez Badillo<sup>1\*</sup>; Mayra Alejandra Espinosa Chico<sup>2</sup>;  
Kelly Katherine Rivera Freire<sup>3</sup>; Daniel Israel Cisneros Silva<sup>4</sup>

## Resumen

La acuicultura artesanal es una actividad económica en crecimiento en la Amazonía ecuatoriana, pero su impacto en ecosistemas acuáticos sigue siendo poco conocido. Este estudio caracterizó las comunidades de fitoplancton y zooplancton en cuatro organizaciones piscícolas para evaluar dicho impacto. Se realizaron cinco muestreos en tres puntos por organización: captación, estanque de producción y cuerpo receptor. Se midieron parámetros fisicoquímicos (Temperatura, pH, OD y fosfatos) y se recolectó plancton para su identificación y recuento. Se aplicaron Análisis de Componentes Principales (ACP) y de Correspondencia Canónica (ACC) para relacionar variables ambientales y biológicas. Además, se calcularon los Índices de Estado Trófico (IET) de Carlson y de Diversidad de Shannon-Weaver (H'). Los resultados mostraron una mayor abundancia de individuos en estanques (28,53 individuos/mL), siendo *Navicula* el género dominante. Las mayores diversidades se registraron en La Delicia (H'=2,15) y Pitumsisa (H'=2,05). El ACC reveló correlaciones positivas entre temperatura y abundancia de organismos totales y géneros como *Navicula* y *Scenedesmus* y entre fosfatos y *Cyclotella*. Se observaron correlaciones negativas entre pH y *Prorocentrum* y *Pinnularia* y entre OD y *Volvox* y *Anabaena*. Se concluye que la piscicultura influye en la estructura de las comunidades bióticas y la calidad del agua, ameritando un manejo sostenible.

**Palabras clave:** Plancton, acuicultura, calidad del agua, Shannon-Weaver, Amazonía, eutrofización.

## Multivariate analysis of planktonic communities in relation to environmental variables in Ecuadorian Amazonian fish farming systems

### Abstract

Artisanal aquaculture is a growing economic activity in the Ecuadorian Amazon, but its impact on aquatic ecosystems remains insufficiently understood. This study characterized the phytoplankton and zooplankton communities in four fish farms to evaluate this impact. Five sampling events were conducted at three points per farm: water intake, production pond, and receiving water body. Physicochemical parameters (Temperature, pH, DO, and phosphates) were measured, and plankton was collected for identification and enumeration. Principal Component Analysis (PCA) and Canonical Correspondence Analysis (CCA) were applied to relate environmental and biological variables. Additionally, Carlson's Trophic State Index (TSI) and the Shannon-Weaver Diversity Index (H') were calculated. The results showed a higher abundance of individuals in the ponds (28.53 individuals/mL), with *Navicula* being the dominant genus. The highest diversity values were recorded in La Delicia (H'=2.15) and Pitumsisa (H'=2.05). The CCA revealed positive correlations between temperature and the abundance of total organisms and genera such as *Navicula* and *Scenedesmus*, and between phosphates and *Cyclotella*. Negative correlations were observed between pH and *Prorocentrum* and *Pinnularia*, and between DO and *Volvox* and *Anabaena*. It is concluded that fish farming influences the structure of biotic communities and water quality, warranting sustainable management.

**Palabras clave:** Plankton, aquaculture, water quality, Shannon-Weaver, Amazon, eutrophication.

**Recibido:** 15 de octubre 2025

**Aceptado:** 01 de abril 2026

<sup>1</sup> Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Ciencias de la Vida, Puyo, Pastaza, Ecuador; lrodriguez@uea.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0007-4301-7944>

<sup>2</sup> Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Ciencias de la Vida, Puyo, Pastaza, Ecuador; mespinosa@uea.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0007-5288-8936>

<sup>3</sup> Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Ciencias de la Vida, Puyo, Pastaza, Ecuador; kelly63rivera@gmail.com

<sup>4</sup> Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Ciencias de la Vida, Puyo, Pastaza, Ecuador; danisrael-90@hotmail.com

\*Autor de correspondencia

## I. INTRODUCCIÓN

La acuicultura es uno de los sectores de producción de alimentos de más rápido crecimiento a nivel mundial, y la acuicultura rural a pequeña escala representa una fuente significativa de proteínas e ingresos para las comunidades de los países en desarrollo (FAO, 2020). En América Latina, países como Ecuador, Brasil y Chile han experimentado un crecimiento acelerado en este sector, contribuyendo significativamente a las economías regionales (FAO, 2024). En la Amazonía ecuatoriana, la piscicultura artesanal, particularmente el cultivo de tilapia (*Oreochromis spp.*), se ha expandido debido a las condiciones ambientales favorables y la alta demanda del mercado (Burgos-Morán & Altamirano-Cantos, 2023)

Sin embargo, la acuicultura puede generar impactos ambientales negativos, incluida la degradación de la calidad del agua, la eutrofización y la pérdida de biodiversidad, debido a la descarga de efluentes ricos en nutrientes y a las toxinas que producen cientos de organismos fitoplanctónicos (Almeida et al., 2025; C. E. Boyd, 2020; Luna et al., 2017). El uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos para mejorar la productividad natural en los estanques puede conducir a la sobresaturación de nutrientes, promoviendo florecimientos algales y el agotamiento del oxígeno (C. Boyd, 2018). Las comunidades de plancton, que comprenden fitoplancton y zooplancton, son fundamentales para las redes tróficas acuáticas y sirven como bioindicadores de la salud del ecosistema (Enawgaw & Wagaw, 2023). Los cambios en su composición y abundancia pueden reflejar alteraciones en la calidad del agua debido a actividades antropogénicas (Tekebayeva et al., 2024).

Los estudios sobre la dinámica del plancton en sistemas de acuicultura en la región amazónica son escasos (Jenkins et al., 2025). La mayoría de las investigaciones se han centrado en operaciones a gran escala, descuidando los sistemas de pequeños productores que pueden tener interacciones ambientales diferentes (Flores-Gómez et al., 2024). Comprender la relación entre los parámetros fisicoquímicos y las comunidades de plancton en estos sistemas es crucial para desarrollar prácticas de manejo sostenible (Tekebayeva et al., 2024).

Este estudio tuvo como objetivo: (1) caracterizar las comunidades de fitoplancton y zooplancton en sistemas de piscicultura artesanal en las cabeceras del río Bobonaza; (2) evaluar la calidad fisicoquímica del agua en puntos de captación, estanque y receptor; y (3) analizar la interrelación entre las poblaciones de plancton y los parámetros fisicoquímicos desde una perspectiva ambiental.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Área de Estudio

El estudio se realizó en la comunidad "Cabeceras del Bobonaza" (Parroquia Veracruz, Provincia de Pastaza, Ecuador) y zonas aledañas, situadas todas cerca del curso alto del río Bobonaza, afluente del Pastaza. Se seleccionaron cuatro organizaciones piscícolas: La Delicia, Orquídeas de Manduro, Pitumsisa y Rancho Verde. El área se caracteriza por un clima subtropical húmedo, con una temperatura media anual de 20,6°C y una precipitación superior a 4200 mm (Fick & Hijmans, 2017). La topografía es plana a medianamente ondulada, con suelos clasificados como Inceptisoles, ácidos y con alto contenido de aluminio (GADPR-Veracruz, 2020).

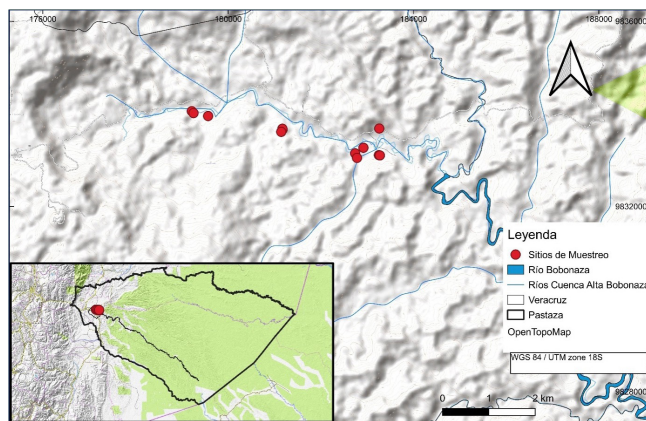


Figura 1. Área de estudio y sitios de muestreo

## 2.2. Fundamentación Teórica y Diseño de Muestreo

El diseño de muestreo se fundamenta en el principio de que las comunidades bióticas, como el plancton, integran los efectos de las condiciones ambientales a lo largo del tiempo, siendo por tanto bioindicadores efectivos de la calidad del agua (Karr, 1981; Wetzel, 2001). Para capturar la variabilidad espacial dentro de cada sistema productivo, se estableció un diseño de muestreo con réplicas en el espacio (tres puntos por organización: captación, estanque y receptor), reconociendo que cada uno representa un hábitat con presiones ecológicas distintas (C. E. Boyd, 2020). Las cinco campañas de muestreo con intervalos de 15 días permitieron obtener una visión robusta de las condiciones medias, minimizando la variabilidad temporal aguda y alineándose con criterios limnológicos que privilegian la frecuencia para capturar tendencias en sistemas dinámicos (Roldán Pérez & Ramírez Restrepo, 2008).

## 2.3. Análisis Físicoquímico y de Plancton: Métodos y Sustentación

Se realizaron mediciones *in situ* de temperatura, pH, CE, OD y turbidez con sondas multiparamétrica, para asegurar la caracterización instantánea y no destructiva del medio y evitar alteraciones de las muestras (APHA & WEF, 2017). Adicionalmente se midió la turbiedad mediante profundidad de disco Secchi, por su relación con la biomasa fitoplanctónica (Carlson, 1977; Fernandez et al., 2022).

Se realizaron capturas de plancton con red de 32  $\mu\text{m}$ , acorde con lo recomendado por Bicudo & Menezes (2006) para la retención de una amplia gama de organismos planctónicos de tamaño nano y microplancton. Se realizaron arrastres horizontales a profundidad Secchi para muestrear en la zona eufótica donde la productividad es máxima. La identificación y conteo se realizó mediante cámara de Neubauer y estereomicroscopio, como método estándar establecido para estudios cuantitativos de plancton, permitiendo la obtención de datos de abundancia (Individuos/mL) para el cálculo de índices ecológicos (Sun & Liu, 2003).

El análisis de nutrientes (P-PO<sub>4</sub>) se realizó por espectrofotometría, método colorimétrico de alta precisión y exactitud recomendado para el monitoreo de aguas naturales y residuales (APHA & WEF, 2017).

## 2.4. Análisis Estadístico

Se calcularon estadísticas descriptivas para todas las variables. El índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') se calculó para cada punto de muestreo. Para explorar las relaciones entre las variables físicoquímicas y la abundancia de plancton se aplicó los siguientes análisis:

- **Análisis de Componentes Principales (PCA):** Se realizó un PCA utilizando el software R (v4.3.0) con el paquete Vegan para visualizar y explorar la importancia de las variables ambientales (temperatura, pH, CE, OD, P-PO<sub>4</sub>) y las más explicativas. Además, se analizó la abundancia de los géneros de plancton más relevantes en todos los sitios de muestreo. El PCA es una técnica multivariada poderosa que reduce la dimensionalidad de los datos, permitiendo identificar los gradientes ambientales principales que explican la distribución de las especies (Legendre & Legendre, 2012). Los datos fueron previamente estandarizados (media=0, desviación estándar=1) para evitar sesgos por las diferentes unidades de medida. Se complementó con un análisis de correlación de Pearson para parámetros individuales.
- **Análisis de Correspondencia Canónica (CCA):** Se lo realizó utilizando el software R (v4.3.0) con los paquetes Vegan, FactoMiner y Factoextra. para visualizar y explorar las asociaciones entre las variables ambientales (temperatura, pH, CE, OD, P-PO<sub>4</sub>) y la abundancia de los géneros de plancton más relevantes en todos los sitios de muestreo. El CCA es una técnica estadística multivariante que analiza la relación entre dos conjuntos de variables: un conjunto de variables respuesta (Y) y un conjunto de variables explicativas (X). Es especialmente útil para datos ecológicos y ambientales (Navarro, 2016). Los datos fueron previamente estandarizados (media=0, desviación estándar=1) para evitar sesgos por las diferentes unidades de medida.
- **Aproximación al Índice del Estado Trófico (IET) de Carlson:** Para proporcionar una evaluación integrada y estandarizada del estado trófico de sitios de captación, estanques y receptores, se calculó

una aproximación al IET (Fósforo Total):  $60 + (14.42 * \ln(PT))$ ; donde PT = Fósforo Total (mg/m<sup>3</sup>). Se utilizaron los valores de P-PO<sub>4</sub> (mg/L) como aproximación, convirtiéndolos a mg/m<sup>3</sup> (x1000) para el cálculo, siguiendo la metodología propuesta por Carlson (1977) y aplicada en estudios de evaluación trófica (Pinto-Coelho et al., 2021). (Secchi):  $60 - (14.41 * \ln(SD))$ ; donde SD = Profundidad Secchi (m). El índice también incluye IET (Clorofila-a):  $60 + (14.42 * \ln(Chl-a))$ , pero es un dato faltante en este estudio. El IET final para cada sitio se consideró como el promedio de los subíndices calculables (IET(SD) e IET(PT)). La clasificación del estado trófico se realizó de acuerdo con Carlson (1977): < 40 Oligotrófico; 40-50 Mesotrófico; 50-70 Eutrófico; > 70 Hipereutrófico (Tanjung et al., 2024).

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Parámetros Físicoquímicos

Los valores promedio de los parámetros físicoquímicos se resumen en la Tabla 1. La temperatura fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en los estanques (26,21°C) en comparación con los puntos de captación (23,7°C) y receptor (24,48°C). El pH más alto se registró en los receptores (7,48), mientras que el más bajo fue en el punto de captación de Rancho Verde (6,03). La conductividad eléctrica fue más alta en La Delicia (88,00 µS/cm) y en los estanques (69,64 µS/cm). El oxígeno disuelto fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en los puntos de captación (8,09 mg/L) y receptor (8,00 mg/L) que en los estanques (5,35 mg/L). Las concentraciones de fosfatos (P-PO<sub>4</sub>) oscilaron entre 0,13 y 0,39 mg/L, sin diferencias significativas entre sitios. Estos niveles de fosfatos son indicativos de condiciones mesotróficas a eutróficas (Carlson, 1977; Pavluk & bij de Vaate, 2017)

Tabla 1. Valores promedio de los parámetros físicoquímicos por punto de muestreo y organización

Parámetro	Valores por punto de muestreo			Valores por Organización			
	Captación	Estanque	Receptor	La Delicia	Orquídeas de Manduro	Pitumsisa	Rancho Verde
	Prom s± Sig	Prom s± Sig	Prom s± Sig	Prom s± Sig	Prom s± Sig	Prom s± Sig	Prom s± Sig
Temp. (°C)	23.70 0.80 a	26.21 1.00 b	24.48 1.10 a	24.00 1.40 a	24.30 1.30 a	25.30 1.80 a	25.50 1.30 a
pH	6.94 0.70 a	6.92 0.30 a	7.48 0.10 b	7.44 0.50 a	6.99 0.50 a	07.09 0.20 a	6.95 0.70 a
C.E. (µS/cm)	44.64 31.10 a	69.64 28.30 b	58.28 3.80 ab	88.00 29.20 a	33.72 23.20 b	50.14 17.60 b	58.22 18.00 ab
O.D. (mg/L)	08.09 0.70 a	5.35 1.70 b	8.00 0.10 a	07.01 2.80 a	7.00 2.20 a	7.00 1.40 a	7.59 0.40 a
P-PO <sub>4</sub> (mg/L)	0.22 0.10 a	0.21 0.10 a	0.20 0.04 a	0.21 0.08 a	0.25 0.12 a	0.17 0.06 a	0.21 0.02 a

Prom: Promedio

s±: Desviación estándar

Sig: Rangos de significación de acuerdo a diferencias significativas ( $p < 0.05$ , prueba de Tukey)

#### 3.2. Abundancia y Diversidad del Plancton

Se identificaron un total de 13 géneros (Tabla 2). La abundancia total de individuos fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en los estanques (28,53 ind./mL) y en Rancho Verde (25,25 ind./mL). El género *Navicula* (diatomea) fue el más abundante, seguido de *Prorocentrum* (dinoflagelado), *Paramecium* (ciliado) y

*Cyclotella* (diatomea).

El índice de Shannon-Weaver (H') indicó una mayor diversidad en los estanques de producción, con La Delicia (H'=2,15) y Pitumsisa (H'=2,05) mostrando los valores más altos. Los puntos de captación y receptor generalmente mostraron una diversidad más baja (H' < 2,0).

**Tabla 2.** Abundancia promedio (Individuos/mL) de los géneros más relevantes y valores del Índice de Shannon-Weaver (H').

Género / Índice	Captación	Estanque	Receptor	La Delicia	Orquídeas de Manduro	Pitumsisa	Rancho Verde
<i>Navicula</i>	2,41 ± 2,5	5,77 ± 4,4	1,84 ± 0,7	1,03 ± 1,0	3,47 ± 3,2	2,38 ± 1,1	6,48 ± 5,0
<i>Prorocentrum</i>	3,00 ± 1,5	4,77 ± 1,8	2,02 ± 1,4	1,80 ± 1,1	4,04 ± 1,5	3,64 ± 2,2	3,58 ± 2,1
<i>Paramecium</i>	2,13 ± 1,2	2,54 ± 1,4	0,48 ± 0,4	1,87 ± 1,2	0,92 ± 1,0	1,54 ± 1,6	2,54 ± 1,4
<i>Cyclotella</i>	1,96 ± 1,6	2,55 ± 1,8	0,56 ± 0,1	2,03 ± 2,2	1,48 ± 2,0	1,17 ± 1,3	2,08 ± 1,5
Abundancia Total	11,95 ± 8,5	28,53 ± 13,6	7,75 ± 3,5	9,54 ± 5,5	16,35 ± 9,6	13,17 ± 9,8	25,25 ± 20,4
H' (Shannon)	1,51 ± 0,5	1,99 ± 0,2	1,74 ± 0,1	1,67 ± 0,6	1,69 ± 0,1	1,74 ± 0,3	1,90 ± 0,2

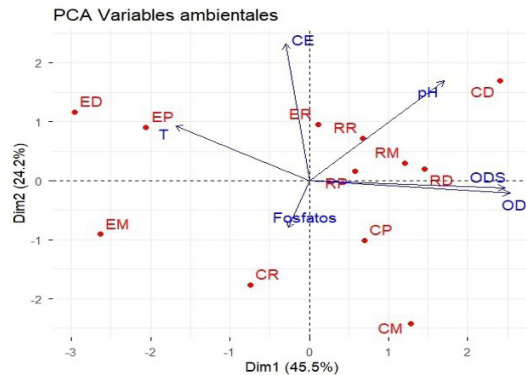
\*Nota: Los valores representan media ± desviación estándar.

Los valores de abundancia total y H' se calculan a partir de todos los géneros identificados.

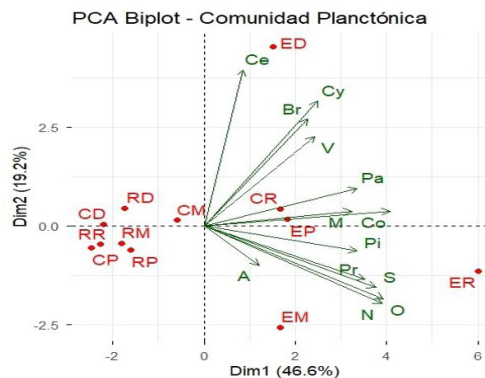
### 3.3. Análisis de Componentes Principales

En el análisis de componentes principales (PCA) de la abundancia de géneros planctónicos muestra que los estanques de todos los sitios de muestreo son ideales

para la reproducción del Fitoplancton y Zooplancton, ya que presentan una alta abundancia total y una alta riqueza de especies.



**Figura 2.** Análisis de componentes principales (PCA) de las variables ambientales por sitio de muestreo  
**Nota:** En color rojo los sitios de muestreo: ED = Estanque La Delicia, EP=Estanque Pitumsisa, ER=Estanque RanchoVerde, EM=Estanque Orquídeas de Manduro, CD = Captación La Delicia, CP=Captación Pitumsisa, CR=Captación RanchoVerde, CM=Captación Orquídeas de Manduro, RD = Receptor La Delicia, RP=Receptor Pitumsisa, RR=Receptor RanchoVerde, RM=Receptor Orquídeas de Manduro. Las flechas azules representan las variables ambientales



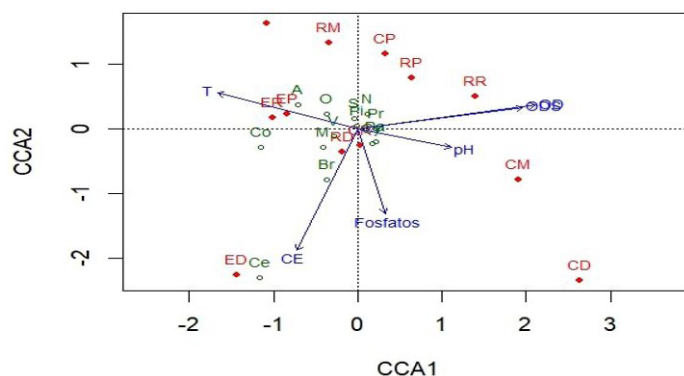
**Figura 3.** Análisis de componentes principales (PCA) de la abundancia de géneros planctónicos por sitio de muestreo  
**Nota:** En color verde las especies cuyo detalle es V= *Volvox* A=*Anabaena*, N=*Navicula*, S=*Scenedesmus*, Pr=*Prorocentrum*, O=*Oscillatoria*, Pa=*Paramecium*, M=*Monhystera*, Cy=*Cyclotella*, Co=*Cosmarium*, Pi=*Pinnularia*, Ce=*Ceratium*, Br=*Brachionus*. En color rojo los sitios de muestreo: ED = Estanque La Delicia, EP=Estanque Pitumsisa, ER=Estanque RanchoVerde, EM=Estanque Orquídeas de Manduro, CD = Captación La Delicia, CP=Captación Pitumsisa, CR=Captación RanchoVerde, CM=Captación Orquídeas de Manduro, RD = Receptor La Delicia, RP=Receptor Pitumsisa, RR=Receptor RanchoVerde, RM=Receptor Orquídeas de Manduro

El Análisis de Componentes Principales para comunidad planctónica y sitios de muestreo (Figura 3) explicó el 67.8% de la varianza total en los dos primeros ejes (PC1: 46.6%, PC2: 19.2%). Los géneros que más contribuyeron al DIM 1 fueron *Cosmarium* (13.2%), *Oscillatoria* (12.3%) y *Navicula* (12.1%). También se observa una correlación positiva con *Scenedesmus*, *Prorocentrum*, *Paramecium*, *Monhystera* asociado al estanque de Rancho Verde, que aporta con el 49.7% a este componente. En el DIM 2, los estanques de la Delicia (68.7%) y Orquídeas de Manduro (21.9%) son los que más aportan al componente y se asocian a la presencia de *Cyclotella* y *Volvox*.

El Análisis de Componentes Principales de las variables ambientales (Figura 2) revela una estructura de dos dimensiones principales que explican el 69.78% de la varianza total (Dimensión 1: 45.54%, Dimensión

2: 24.24%). Los estanques de La Delicia (ED) y de Orquídeas de Manduro (EM) tienen contribuciones y representaciones muy altas en la Dimensión 1 ( $ctr=26.6$  y  $21.2$ ;  $\cos^2=0.59$  y  $0.81$ ), mientras que las captaciones de Orquídeas de Manduro (CM) y Rancho Verde (CR) destacan en la Dimensión 2 ( $ctr=33.6$  y  $17.8$ ). Las variables OD ( $\cos^2=0.95$  y  $0.91$ ) correlacionan fuertemente con la Dimensión 1, y CE ( $\cos^2=0.80$ ) con la Dimensión 2. La Dimensión 3 (16.21%) está dominada por Fosfatos ( $\cos^2=0.88$ ). La Temperatura (T) juega un papel crucial, oponiéndose a otras variables. En el Dim.1 están variables como OD (Oxígeno Disuelto) lo que se podría interpretar como un contraste de condiciones de aguas más frías y oxigenadas en el lado negativo, frente a aguas más cálidas en el lado positivo.

### 3.4. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA)



**Figura 4.** Análisis de CCA entre variables ambientales (independientes) y abundancia de especies (respuesta)  
**Nota:** En color rojo los sitios de muestreo. Las flechas azules representan las variables ambientales y en color verde las especies cuyo detalle es V=Volvox A=Anabaena, N=Navicula, S=Scenedesmus, Pr=Prorocentrum, O=Oscillatoria, Pa=Paramecium, M= Monhystera, Cy=Cyclotella, Co=Cosmarium, Pi=Pinnularia, Ce=Ceratium, Br=Brachionus.

El análisis de correspondencia canónica (Figura 3) muestra que el 49,9% de la varianza de los datos de comunidad de especies de fitoplancton y zooplancton está explicada por las variables ambientales, lo cual representa una correlación bastante fuerte tratándose de datos ecológicos. Sin embargo, no se evidenció una incidencia significativa de las variables ambientales sobre la presencia de especies (Chi-cuadrado = 0.27; F = 0.4946; p = 0.987). En el gráfico se muestra la presencia de especies concentradas en el centro del cuadrante a excepción de *Ceratium* que se encuentra principalmente en el estanque de La Delicia en la cual incide fuertemente la Conductividad Eléctrica. La temperatura podría incidir sobre la abundancia

de *Anabaena*, *Oscillatoria* y *Cosmarium* que son más abundantes en los estanques de Pitumsisa, Rancho Verde y Orquídeas de Manduro. La temperatura se correlacionó de manera positiva con la abundancia de la mayoría de los géneros planctónicos (*Anabaena*, *Cosmarium*, *Scenedesmus*, *Monhyster*, *Oscillatoria*, *Volvox*), y negativamente correlacionado con el oxígeno disuelto (OD). Este eje separó claramente la mayoría de las muestras de estanques (lado derecho del gráfico) de las muestras de captación y receptor (lado izquierdo). Esto confirma que los estanques son ambientes más cálidos, con menor OD y mayor abundancia planctónica. El PC2 estuvo positivamente correlacionado con el pH y la conductividad eléctrica (CE), y negativamente con los

fosfatos (P-PO<sub>4</sub>) y el género *Cyclotella*. Este eje ayudó a diferenciar algunas organizaciones entre sí.

### 3.5. Estado Trófico (IET de Carlson)

El cálculo del Índice del Estado Trófico de Carlson, basado en la profundidad Secchi y los fosfatos, reveló una condición predominante Eutrófica en los estanques de producción, con un valor promedio de IET de 59,5. Los puntos de captación mostraron una condición Mesotrófica (IET promedio = 47,3), mientras que los cuerpos receptores presentaron una condición de transición Mesotrófica-Eutrófica (IET promedio = 52,7). La organización Rancho Verde presentó el estado trófico más avanzado, con su estanque clasificado como Eutrófico.

### 3.6. Relaciones individuales entre Variables

El análisis de correlación de Pearson reveló relaciones significativas ( $p < 0,05$ ) entre los parámetros fisicoquímicos y géneros planctónicos específicos. Estos hallazgos son consistentes con los patrones visualizados en el análisis de PCA (Figura 2).

- Temperatura mostró correlaciones positivas con los organismos totales ( $r=0,717$ ), *Navicula* ( $r=0,587^*$ ), *Scenedesmus* ( $r=0,700$ ), *Prorocentrum* ( $r=0,636^*$ ), *Oscillatoria* ( $r=0,739$ ), *Cosmarium* ( $r=0,740$ ) y *Volvox* ( $r=0,558^*$ ).
- pH se correlacionó negativamente con *Prorocentrum* ( $r=-0,506^*$ ) y *Pinnularia* ( $r=-0,569^*$ ).
- Oxígeno Disuelto se correlacionó negativamente con *Volvox* ( $r=-0,676$ ) y *Anabaena* ( $r=-0,781$ ).
- Fosfatos (P-PO<sub>4</sub>) se correlacionaron positivamente con *Cyclotella* ( $r=0,603^*$ ).

## IV. DISCUSIÓN

La clara segregación de los estanques en el PCA versus los sitios de captación y el cuerpo receptor (Figura 2) valida el fundamento teórico inicial: estos sistemas operan como ecosistemas intensificados. La correlación negativa entre OD y abundancia planctónica en el PC1 refleja el consumo de oxígeno por la respiración comunitaria y la descomposición de la biomasa orgánica generada in situ, un principio central de la metabolización de la energía en sistemas acuáticos (Sharma et al., 2016). Los estanques, al

ser sistemas semicerrados con recambio limitado, acumulan nutrientes (como lo sugiere el IET eutrófico), lo que, unido a la mayor temperatura, conduce a una productividad primaria elevada (representada por la abundancia de fitoplancton), que a su vez conduce a una mayor respiración y consumo de OD, confirmando el vínculo teórico entre nutrientes, productividad y metabolismo del ecosistema (Hahn, C.M., Grajales, Q., Toro, D. & Henao, 2007)

El estado trófico Eutrófico determinado por el IET de Carlson proporciona una clasificación cuantitativa y estandarizada que sustenta las observaciones ecológicas y confirma que el enriquecimiento de nutrientes en los estanques es suficiente para impulsar una alta productividad, situando a estos sistemas en una condición de riesgo donde los florecimientos algales y la hipoxia son probables (C. E. Boyd, 2020; Carlson, 1977). El hecho que los receptores muestren una condición meso-eutrófica indica un impacto discernible del efluente de la piscicultura, diluido, pero no neutralizado por el cuerpo receptor.

La mayor temperatura del agua en los estanques es consistente con su naturaleza léntica, poca profundidad y exposición a la radiación solar, lo que favorece el calentamiento (Welch, 1952; Wetzel, 2001). Esta temperatura elevada favorece las tasas metabólicas y reproductivas de muchos organismos planctónicos, lo que explica las correlaciones positivas encontradas con varios géneros (Roldán Pérez & Ramírez Restrepo, 2008; Zohary et al., 2021). Los valores de pH en los receptores, ligeramente básicos, probablemente estén influenciados por las características geológicas de los suelos de la cuenca, ricos en arcilla y caliza (GADPV, 2015; DINARA, 2010). El pH es un factor que usualmente es un factor determinante de la dinámica comunitaria de fitoplancton (Kozak et al., 2020). La correlación negativa entre el pH y *Prorocentrum* y *Pinnularia* se alinea con la preferencia de estos géneros por aguas ligeramente ácidas, según lo reportado por Junta de Andalucía (2010) y Jiménez (1983).

Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto en los estanques son un fenómeno común en sistemas de acuicultura, resultado de la alta respiración de la comunidad, la descomposición de materia orgánica (alimento no consumido, heces) y la demanda de oxígeno de los peces en alta densidad (Boyd, 1998; Massol, 2002). La fuerte correlación negativa entre el OD y los géneros *Volvox* y *Anabaena* confirma su

asociación con ambientes eutróficos donde se produce el agotamiento de oxígeno debido a la descomposición bacteriana (Baird, 2001; Goldman & Horne, 1983). *Anabaena*, una cianobacteria, incluso puede fijar nitrógeno atmosférico en condiciones de bajo oxígeno, lo que le da una ventaja competitiva en tales ambientes (Paerl, 1982).

La correlación positiva entre los fosfatos y la diatomea *Cyclotella* es ecológicamente coherente (Xu et al., 2010). Las diatomeas a menudo dominan en aguas enriquecidas con fósforo debido a su alta eficiencia en la absorción de nutrientes y sus rápidas tasas de crecimiento (D'Angelo & Wiedenmann, 2014). Los niveles de fosfatos registrados (0,13-0,39 mg/L P-PO<sub>4</sub>) respaldan condiciones productivas, pero también indican un riesgo de eutrofización si los efluentes no se manejan adecuadamente (Conci et al., 2024). El fitoplancton incrementa su abundancia en presencia de fosfatos, sin embargo, la falta de fosfatos no se ha demostrado que limite realmente la producción Fito planctónica (Xu et al., 2010)

La mayor abundancia y diversidad de plancton en los estanques, particularmente en Rancho Verde, puede atribuirse al enriquecimiento de nutrientes por las prácticas de manejo (posible fertilización, alimentación) y el limitado recambio de agua, lo que crea un ambiente propicio para el crecimiento del plancton (Jahan y Singh 2023). lo que se corrobora con los valores eutróficos del IET de Carlson y su posición en el PCA (Figura 2). La menor diversidad en los cuerpos receptores, aunque no severamente impactados, sugiere un efecto de dilución y posiblemente un inicio de impacto por la descarga de efluentes de los estanques. El dominio de géneros tolerantes como *Navicula* y *Prorocentrum* respalda aún más la influencia del enriquecimiento orgánico (Hahn, C.M., Grajales, Q., Toro, D. & Henao, 2007; Moreira & García Padilla, 2010; Stoecker et al., 1997) y que estos géneros se ven favorecidos por la eutrofización de las aguas ((Nieva et al., 2019; Sahraoui et al., 2013)

Nuestros hallazgos sobre la estructura de las comunidades planctónicas y su respuesta a los nutrientes son consistentes con estudios en otros sistemas de acuicultura tropical. Por ejemplo, investigaciones en estanques piscícolas brasileños también encontraron un dominio de diatomeas y cianobacterias vinculado a aportes de nutrientes, con una diversidad que disminuye con el aumento de la eutrofización (Bicudo & Menezes, 2006). En cuanto a la incidencia de los factores físico-

químicos en la comunidad plantónica, el estudio muestra un comportamiento similar al presentado en Saragih y Erizka en 2018 en la cual también se observó una correlación débil del pH, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez entre otros con la abundancia de fitoplancton en general (Saragih & Erizka, 2018). El uso del índice de Shannon en nuestro estudio es estándar, pero incorporar índices de diversidad funcional (p. ej., basados en rasgos como tamaño, motilidad, grupo trófico) podría proporcionar información más profunda sobre cómo se altera el funcionamiento del ecosistema por las prácticas acuícolas (Litchman et al., 2015)

## V. CONCLUSIONES

1. Los sistemas de piscicultura artesanal en las cabeceras del Bobonaza modifican la calidad fisicoquímica del agua, evidente en el aumento de la temperatura, la alteración del pH, la mayor conductividad y los niveles más bajos de oxígeno disuelto en los estanques de producción en comparación con las fuentes de agua y los cuerpos receptores.
2. Las comunidades de plancton responden a estos cambios ambientales, mostrando mayor abundancia y diversidad en los estanques. Los géneros *Navicula*, *Prorocentrum*, *Paramecium* y *Cyclotella* fueron los más abundantes y mostraron correlaciones significativas con las variables fisicoquímicas.
3. La temperatura fue el factor que más influyó positivamente en la abundancia de la mayoría de los géneros de plancton. El oxígeno disuelto mostró una relación negativa con géneros indicadores de ambientes eutróficos (*Volvox*, *Anabaena*). Los fosfatos promovieron el crecimiento de diatomeas como *Cyclotella*.
4. La aplicación del Índice del Estado Trófico de Carlson clasificó a los estanques como Eutróficos, confirmando cuantitativamente el enriquecimiento de nutrientes, mientras que el análisis multivariado (PCA) demostró visualmente la fuerte asociación entre las condiciones de los estanques (alta temperatura, baja oxigenación) y la abundancia de la comunidad planctónica.
5. Aunque los cuerpos receptores no mostraron una eutrofización extrema, la diversidad planctónica reducida y las tendencias

fisicoquímicas indican la necesidad de implementar medidas de mitigación para prevenir impactos acumulativos a largo plazo.

### Recomendaciones

1. Prácticas de Manejo: Implementar lagunas de sedimentación o humedales artificiales para el tratamiento del efluente antes de su descarga en los cuerpos de agua naturales. Optimizar las estrategias de alimentación para reducir los desechos.
1. Investigación Futura: Se recomienda medir la clorofila-a en futuros monitoreos para completar el cálculo del IET de Carlson y obtener una evaluación trófica más precisa, Ampliar el estudio para incluir variaciones estacionales (épocas seca y lluviosa) y emplear técnicas moleculares (como secuenciación de ADN) para una identificación más precisa de la comunidad planctónica, incluidas especies no visibles.
1. Bioindicación: Desarrollar un índice biótico de integridad (IBI) planctónico específico para evaluar la calidad del agua en sistemas acuícolas amazónicos, incorporando métricas como el porcentaje de cianobacterias, índices de diatomeas y la relación entre la biomasa de zooplancton y fitoplancton.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a las organizaciones piscícolas de Cabeceras del Bobonaza por su colaboración y acceso a sus instalaciones.

### VI. REFERENCIAS

Almeida, É. C., Jacinavicius, F. R., Passos, L. S., Médice, R. V., Marques, L. G., Crnkovic, C. M., Marinho, M. M., de Carvalho Gomes, L., & Pinto, E. (2025). Phytoplankton composition and metabolomic profiles in aquaculture systems: A case study in Brazil's natural lakes. *Aquaculture*, 599, 742135. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742135>

APHA, A., & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23a ed.). American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. <https://openlibrary.org/books/OL32493189M>

Bicudo, C., & Menezes, M. (2006). *Gêneros de Algas de Águas Continentais do Brasil: chave para identificação e descrições* (2a ed.). RiMa. [https://www.researchgate.net/publication/272563598\\_Generos\\_de\\_Algas\\_de\\_Aguas\\_Continentais\\_do\\_Brasil\\_chave\\_para\\_identificacao\\_e\\_descricoes](https://www.researchgate.net/publication/272563598_Generos_de_Algas_de_Aguas_Continentais_do_Brasil_chave_para_identificacao_e_descricoes)

Boyd, C. (2018). Aquaculture pond fertilization. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 13. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201813002>

Boyd, C. E. (2020). *Water Quality: An Introduction* (3a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8>

Burgos-Morán, R. E., & Altamirano-Cantos, C. (2023). Caracterización de la piscicultura amazónica ecuatoriana, un panorama de su desarrollo y perspectivas. *AquaTechnica Revista Iberoamericana de Acuicultura*, 5(3), 182–206. <https://doi.org/10.33936/at.v5i3.5161>

Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369. <https://doi.org/10.4319/l0.1977.22.2.0361>

Conci, E., Civit, B. M., & Becker, A. R. (2024). Impacto Ambiental del Fósforo en Sistemas Acuáticos Regionales. *AJEA, AJEA* 37. <https://doi.org/10.33414/ajea.1694.2024>

D'Angelo, C., & Wiedenmann, J. (2014). Impacts of nutrient enrichment on coral reefs: New perspectives and implications for coastal management and reef survival. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.029>

Enawgaw, Y., & Wagaw, S. (2023). Phytoplankton communities and environmental variables as indicators of ecosystem productivity in a shallow tropical lake. *Journal of Freshwater Ecology*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/02705060.2023.2216244>

FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/170b89c1-7946-4f4d-914a-fc56e54769de/content>

FAO. (2024). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. En *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cdo683es>

Fernandez, D., Muñoz, L., & Coronel, E. F. (2022). Profundidad de disco de secchi y su relación con la turbidez y clorofila "A" en el embalse San Jacinto, Tarija, Bolivia. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, 15(2), 957. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.80136>

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). *WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas*. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.

Flores-Gómez, V. S., Quispe, C. V., Ordoño, D. A., Costa, A. B. da, & Lobo, E. A. (2024). Phytoplankton in lake water quality assessment: a review of scientific literature based on bibliometric and network techniques. En *Acta Limnologica Brasiliensia* (Vol. 36). Brazilian Limnology Association. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X0924>

GADPR-Veracruz. (2020). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Veracruz*. [https://veracruz.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/PDOT\\_VERACRUZ\\_GG-OFICIAL.pdf](https://veracruz.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/PDOT_VERACRUZ_GG-OFICIAL.pdf)

Hahn, C.M., Grajales, Q., Toro, D. & Henao, A. (2007). Producción limnológica en estanques para el levante de larvas y postlarvas de especies icticas nativas y foraneas. Caldas, Colombia. *Ingeniería en producción acuícola*, 2(1909-8138).

Jahan, S., & Singh, A. (2023). The Role of Phytoplanktons in the Environment and in Human Life, a Review. *BASRA JOURNAL OF SCIENCE*, 41, 392-411. <https://doi.org/10.29072/basjs.20230212>

Jenkins, C., Athayde, S., Beveridge, C., Correa, S.,

Espinoza, J., Heilpern, S., Herrera-R, G., Victoria Lacy, L., Olivas, P., Oliveira, A., Piland, N., Utsunomiya, R., & Anderson, E. (2025). Global importance of Amazonian freshwaters. *Frontiers in Ecology and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/fee.2868>

Karr, J. (1981). Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities. *Fisheries*, 6, 21-27. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1981\)006%3C0021:A0BIUF%3E2.O.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1981)006%3C0021:A0BIUF%3E2.O.CO;2)

Kozak, A., Budzyńska, A., Dondajewska-Pielka, R., Kowalczevska-Madura, K., & Goldyn, R. (2020). Functional groups of phytoplankton and their relationship with environmental factors in the restored uzarzewskie lake. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020313>

Litchman, E., de Tezanos Pinto, P., Klausmeier, C. A., Thomas, M. K., & Yoshiyama, K. (2015). Trait-based community ecology of phytoplankton. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46, 615-639. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110411-160251>

Luna, R. O., Palomino, A., Días, A. H., Ángel, J., Larios, H., & Godínez, D. E. (2017). Un enfoque sustentable al cultivo de tilapia |. *Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal*, 27(5), 19-25. <https://doi.org/doi:10.15174/au.2017.1231>

Moreira, J., & García Padilla, D. (2010). *Atlas de organismos planctónicos en los humedales de Andalucía* (Consejería de Medio Ambiente., Ed.). Junta de Andalucía.

Navarro, A. (2016). *Multivariate Statistical Methods A Primer* (4a ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315382135>

Nieva, Á. M., Seeligmann, C. T., & Maidana, N. I. (2019). Diatomeas perifíticas de un río de montaña (Tucumán, Argentina). *Lilloa*. <https://doi.org/10.30550/j.lil/2019.56.1/5>

Pavluk, T., & bij de Vaate, A. (2017). Trophic Index and Efficiency. En B. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)* (Second Edition, pp.

- 495–502). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.00608-4>
- Roldán Pérez, G., & Ramírez Restrepo, J. J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical* (2a ed.). Editorial Universidad de Antioquia; Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. <https://repositorio.accefyn.org.co/entities/publication/9724561e-4f80-432b-ab36-46d8af8ddd4a>
- Sahraoui, I., Bouchouicha, D., Mabrouk, H. H., & Hlaili, A. S. (2013). Driving factors of the potentially toxic and harmful species of *Prorocentrum Ehrenberg* in a semi-enclosed Mediterranean lagoon (Tunisia, SW Mediterranean). *Mediterranean Marine Science*, 14(2). <https://doi.org/10.12681/mms.338>
- Saragih, G. M., & Erizka, W. (2018). Keanekaragaman Fitoplankton Sebagai Indikator Kualitas Air Danau Sipin Di Kota Jambi. *Jurnal Daur Lingkungan*, 1(1). <https://doi.org/10.33087/daurling.vii.1.5>
- Sharma, R. C., Singh, N., & Chauhan, A. (2016). The influence of physico-chemical parameters on phytoplankton distribution in a head water stream of Garhwal Himalayas: A case study. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(1), 11–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejar.2015.11.004>
- Stoecker, D. K., Li, A., Coats, D. W., Gustafson, D. E., & Nannen, M. K. (1997). Mixotrophy in the dinoflagellate *Prorocentrum minimum*. *Marine Ecology Progress Series*, 152(1–3). <https://doi.org/10.3354/meps152001>
- Sun, J., & Liu, D. (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 25(11), 1331–1346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/plankt/fbg096>
- Tanjung, R. H. R., Indrayani, E., Agamawan, L. P. I., & Hamuna, B. (2024). Water quality assessment to determine the trophic state and suitability of Lake Sentani (Indonesia) for various utilisation purposes. *Water Cycle*, 5, 99–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2024.02.006>
- Tekebayeva, Z., Bazarkhankyzy, A., Temirbekova, A., Rakhymzhan, Z., Kulzhanova, K., Beisenova, R., Kulagin, A., Askarova, N., Yevneyeva, D., Temirkhanov, A., & Abzhalelov, A. (2024). Ecological Assessment of Phytoplankton Diversity and Water Quality to Ensure the Sustainability of the Ecosystem in Lake Maybalyk, Astana, Kazakhstan. *Sustainability (Switzerland)*, 16(22). <https://doi.org/10.3390/su16229628>
- Welch, P. S. (1952). *Limnology: Running Waters in General*. McGraw-Hill. <https://www.worldcat.org/title/limnology/oclc/187195>
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3a ed.). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780127447605/limnology>
- Xu, H., Paerl, H. W., Qin, B., Zhu, G., & Gao, G. (2010). Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. En *Limnol. Oceanogr.* e American Society of Limnology and Oceanography. <https://doi.org/https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.04200pe>
- Zohary, T., Flaim, G., & Sommer, U. (2021). Temperature and the size of freshwater phytoplankton. En *Hydrobiologia* (Vol. 848, Número 1). <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04246-6>