



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

Facultad de
Ciencias e Ingeniería

Evaluación de la densidad y características de *Nostoc sphaericum* en relación a
cultivos agrícolas en San Pedro de Cajas

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN BIOLOGÍA

AUTOR(ES)

ALBERTO PABLO MONTES HORNA

GABRIEL OSNAYO JACINTO

ASESOR(ES)

FELIPE CARLOS YON TORRES

LIMA – PERÚ

2026

Jurado calificador

Presidente: Dr. Jose Miguel Perez Zuñiga

Vocal: Msc. Luis Alberto Rossi Mayo

Secretario: Mag. Luis Ramon Huaman Mesia



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	MONTES HORNA ALBERTO PABLO
2.	OSNAYO JACINTO GABRIEL

Pertencientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE BIOLOGÍA**, autores del trabajo titulado: **Evaluación de la densidad y características de *Nostoc sphaericum* en relación a cultivos agrícolas en San Pedro de Cajas**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN BIOLOGÍA** bajo la modalidad de **TESIS**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	YON TORRES FELIPE CARLOS	FACI	ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **6%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3505422860**; fecha de entrega: **<<12/03/2026>>**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 12 de marzo de 2026**

Firma del asesor

Nº DNI: 43556286

ORCID: 0000-0002-5667-873X

Contenido	
Resumen.....	1
Abstract	2
I. Introducción.....	3
II. Hipótesis	9
III. Pregunta de investigación:	10
3.1 Problema general	10
3.2 Problemas específicos	10
IV. Objetivo.....	10
4.1 Objetivo general.....	10
4.2 Objetivo específico	11
V. Materiales y método	11
5.1 Puntos de colecta	11
5.1.1 Recolección de muestras	13
5.1.2 Medición de parámetros fisicoquímicos <i>in situ</i>	14
5.2 Conteo y medición de cianobacterias.....	15
5.3 Análisis fisicoquímicos.....	15
5.3.1 Determinación de nitrato y fosfatos	16
5.3.2 Determinación de alcalinidad.....	16
5.3.3 Determinación de dureza total	16
5.3.4 Mediciones auxiliares	16
5.4 Análisis estadísticos.....	17
VI. Resultados	18
6.1 Hallazgo estacional.....	18
6.2 Propiedades fisicoquímicas	19
6.3 Diámetro y Densidad.....	25
VII. Discusión	34
7.1 Variables ambientales	34
7.2 Tamaño y abundancia de <i>Nostoc</i>.....	36
7.3 Distancia a factores antropogénicos.....	39
VIII. Conclusiones.....	40
IX. Referencias bibliográficas.....	41
Anexos.....	49

Resumen

Nostoc sphaericum, "cushuro", es una cianobacteria de alto valor ecológico y nutricional que habita cuerpos de agua altoandinos. En el distrito de San Pedro de Cajas, su presencia ha disminuido, siendo la expansión agrícola y la modificación del uso del suelo las causas sospechadas de este declive. El objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre la proximidad a zonas agrícolas/pobladas y la densidad de *N. sphaericum*, caracterizando a su vez las condiciones fisicoquímicas de sus hábitats.

El muestreo se realizó en tres sitios de muestreo representativos (Roca, Ladera y Parpacocha) durante las temporadas seca y lluviosa, registrando densidad, diámetro y variables fisicoquímicas (como pH, Sólidos Disueltos Totales - TDS, conductividad, dureza y alcalinidad). Se midió la distancia lineal desde cada sitio hasta viviendas y campos agrícolas.

Los resultados mostraron que *N. sphaericum* estuvo ausente en la temporada seca y presente solo en la lluviosa. Contrario a la hipótesis inicial, no se encontró una correlación directa entre la distancia a los campos agrícolas y la densidad del organismo. En cambio, la distribución se limitó a microhábitats específicos con menor presión antrópica (cavidades rocosas, bofedales) y se asoció fuertemente con bajos valores de Sólidos Disueltos Totales (TDS).

Estos hallazgos indican que la presión agrícola sobre *N. sphaericum* no actúa a través de una simple proximidad, sino de una interacción compleja que incluye la modificación del hábitat (uso del suelo) y la alteración de la calidad del agua (mineralización). La distribución depende de la integridad del sustrato, la disponibilidad de agua y los bajos TDS. Se resalta la necesidad de conservar los bofedales altoandinos como refugios naturales frente a la expansión agrícola.

Palabras clave: *Nostoc sphaericum*, cianobacteria, bofedales altoandinos, uso del suelo, calidad del agua, agricultura, conservación.

Abstract

Nostoc sphaericum, commonly known as “cushuro,” is a cyanobacterium of high ecological and nutritional value that inhabits high-Andean freshwater ecosystems. In the district of San Pedro de Cajas, its presence has declined, with agricultural expansion and land-use modification suspected as the main causes of this decline. The objective of this study was to evaluate the relationship between proximity to agricultural and populated areas and the density of *N. sphaericum*, while also characterizing the physicochemical conditions of its habitats.

Sampling was conducted at three representative sampling sites (Roca, Ladera, and Parpacocha) during both the dry and rainy seasons, recording density, colony diameter, and physicochemical variables such as pH, Total Dissolved Solids (TDS), conductivity, hardness, and alkalinity. The linear distance from each sampling site to nearby dwellings and agricultural fields was also measured.

Results showed that *N. sphaericum* was absent during the dry season and present only during the rainy season. Contrary to the initial hypothesis, no direct correlation was found between the distance to agricultural fields and the organism’s density. Instead, its distribution was restricted to specific microhabitats with lower anthropogenic pressure (rock cavities and high-Andean wetlands) and was strongly associated with low Total Dissolved Solids (TDS) values.

These findings indicate that agricultural pressure on *N. sphaericum* does not operate merely through spatial proximity, but through a complex interaction involving habitat modification (land use) and alterations in water quality (mineralization). The species’ distribution depends on substrate integrity, water availability, and low TDS concentrations. This study highlights the importance of conserving high-Andean wetlands as natural refuges in the face of agricultural expansion.

Keywords: *Nostoc sphaericum*, cyanobacteria, high-Andean wetlands, land use, water quality, agriculture, conservation.

I. Introducción

Nostoc sphaericum (Tabla 1), conocido comúnmente como cushuro, es una cianobacteria de forma esférica, textura gelatinosa y colores que varían entre el verde azulado y el amarillo oscuro. Morfológicamente, se presenta en colonias mucilaginosas de aspecto globoso, compuestas por filamentos enroscados llamados tricomas, los cuales están inmersos en una matriz gelatinosa (1). Cada tricoma está formado por células dispuestas en cadena, pudiendo encontrarse tanto de forma aislada como en agregados visibles a simple vista (2). Estos organismos fotosintéticos prosperan en condiciones extremas, especialmente en cuerpos de agua dulce de zonas altoandinas, entre los 3000 y 5000 m.s.n.m., donde los nutrientes son escasos y las condiciones ambientales son exigentes, tales como alta radiación solar, bajas temperaturas y bajo contenido de oxígeno (3).

Esta cianobacteria crece en ambientes con baja disponibilidad de nutrientes y minerales, ocupando hábitats como ríos, lagos, lagunas, manantiales y bofedales altoandinos (3,4). Se ha reportado su presencia en países andinos como Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia, especialmente en ecosistemas frágiles de altura, donde el pH del agua suele encontrarse entre 6.5 y 8.5, presentando además temperaturas promedio entre 5 °C y 15 °C y alta radiación UV (5,6). Estas condiciones pueden afectar su biomasa y ciclo reproductivo, como se ha evidenciado en estudios realizados en humedales tropicales, donde *Nostoc sphaericum* ajusta su ciclo de vida en función de la duración de la temporada seca mediante la formación de colonias compactas y pigmentadas, y la producción de estructuras de resistencia como akinetos, reactivando su crecimiento activo durante las lluvias por medio de hormogonias (7).

División	Cyanophyta
Clase	<i>Nostocphyceae</i>
Orden	<i>Homogonales</i>
Suborden	<i>Heterocytineae</i>
Familia	<i>Nostocaceae</i>
Género	<i>Nostoc</i>
Especie	<i>N. sphaericum</i>

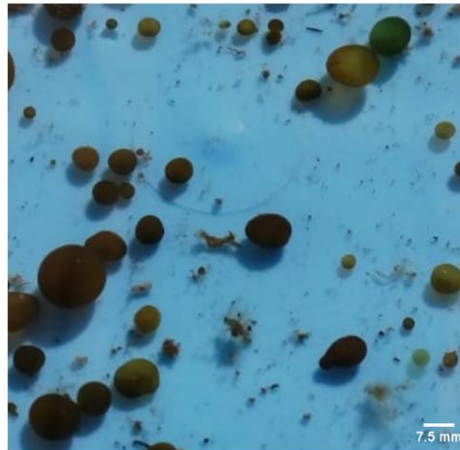


Tabla 1: Taxonomía del Cushuro, extraído de (R. Rubio, 2018) y foto propia del cushuro

Históricamente, *Nostoc sphaericum* ha sido recolectado y consumido por comunidades rurales andinas debido a su alto valor nutricional, ya que constituye una fuente de proteínas, carbohidratos, vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes (2,3,4,8). Estudios etnobotánicos indican que su uso se remonta a épocas preincaicas, donde formaba parte de la dieta tradicional altoandina, especialmente durante períodos de escasez alimentaria (9). Desde tiempos precolombinos fue un alimento complementario en pobladores de los Andes, y durante el Imperio Incaico su ingesta fue recomendada a todos los vasallos para fortalecer los dientes y huesos; sin embargo, fue desestimado por los conquistadores españoles, quedando su consumo limitado a pobladores de la precordillera andina (10).

En los últimos años, la popularidad de esta cianobacteria ha aumentado significativamente debido a su valor nutricional, sabor neutro y ausencia de olor, lo que ha favorecido su consumo tanto en su forma fresca como deshidratada, especialmente en restaurantes, hogares y centros estéticos (11, 12, 13). *Nostoc sphaericum* ha sido considerado tradicionalmente como un alimento con propiedades preventivas frente a la anemia; no obstante, estudios experimentales en ratas no han encontrado evidencia suficiente que sustente este beneficio (14). Es importante mencionar que esta cianobacteria no presenta toxicidad para el ser humano, ya que no contiene toxinas ni bacterias patógenas como *Escherichia coli*, *Salmonella sp.* o *Staphylococcus aureus* (15).

Nostoc sphaericum presenta una composición nutricional destacable que respalda su potencial como alimento funcional. Los alimentos funcionales son aquellos que, más allá de la nutrición básica, aportan beneficios adicionales para la salud debido a sus componentes bioactivos. En el caso de *Nostoc*, su perfil cumple con esta definición: contiene aproximadamente 28 % de proteínas de alto valor biológico, 62 % de carbohidratos, 0.7 % de grasa y 0.9 % de fibra. Además, aporta concentraciones relevantes de minerales esenciales como calcio (377 mg/100 g) y hierro (4.8 mg/100 g) (16). Una porción de 100 g de biomasa seca aporta alrededor de 28 g de proteína (cubriendo entre el 50 % y 60 % del requerimiento diario de un adulto), cerca del 38 % del calcio recomendado (1 g/día) y entre el 30 % y 60 % del hierro según sexo y edad (17). Esta composición rica en proteínas, calcio y hierro (16,17) confirma el valor nutricional de *Nostoc sphaericum* y su importancia potencial en comunidades altoandinas con dietas limitadas.

Además, contiene compuestos fenólicos que no sólo la protegen contra condiciones ambientales adversas (radiación UV, radicales libres, estrés oxidativo), sino que también actúan como antioxidantes en la dieta humana, contribuyendo a la protección celular y a la prevención de enfermedades asociadas al daño oxidativo (6). A pesar de que las investigaciones sobre *Nostoc sphaericum* aún están en desarrollo, la aplicación de los posibles beneficios observados, como su valor nutricional y ecológico, son promisorios. No obstante, es necesario evaluar rigurosamente su seguridad y eficacia antes de promover su consumo más amplio.

Pese a esta importancia, su recolección ha disminuido notablemente. En zonas como San Pedro de Cajas (Tarma, Junín), entrevistas realizadas durante un proyecto piloto revelan que la población percibe una marcada disminución de *N. sphaericum* en las lagunas cercanas al pueblo (Ayala, 2021, comunicación personal). Los habitantes atribuyen este fenómeno principalmente a una extracción excesiva durante años pasados (Luna, 2021, comunicación personal), cuando el cushuro era fácilmente accesible y muy demandado por sus presuntas propiedades beneficiosas para la salud.

A esta sobreexplotación histórica se suman amenazas ambientales recientes. En este contexto, el uso intensivo de pesticidas en la agricultura, empleados comúnmente para

el control de plagas y enfermedades en diversos cultivos, representa una amenaza significativa para los ecosistemas acuáticos, incluida la microbiota como las cianobacterias. Estos compuestos pueden llegar a cuerpos de agua a través del escurrimiento superficial, infiltración o percolación, alterando la composición y funcionalidad de las comunidades microbianas. En el caso de las cianobacterias, la exposición a pesticidas puede afectar procesos clave como la fotosíntesis, la fijación biológica de nitrógeno, la síntesis de biomoléculas esenciales y la integridad de membranas y enzimas celulares (18). Al tratarse de organismos fotosintéticos primarios, son particularmente sensibles a los cambios fisicoquímicos inducidos por contaminantes en su entorno acuático (19).

El impacto de estos agroquímicos es dual. Por un lado, ciertos herbicidas de uso común, como el glifosato y el 2,4-D, contienen grupos nitrogenados que, al degradarse, liberan formas reactivas de nitrógeno como amonio y nitratos, incrementando la carga de nutrientes en el agua (20). Este fenómeno puede inducir un crecimiento descontrolado de *Nostoc sphaericum* y de otras cianobacterias oportunistas, alterando el equilibrio de la comunidad microbiana y favoreciendo la aparición de floraciones algales nocivas (21). Por ejemplo, en la laguna Conococha (Áncash), se documentó en 2012 un proceso de eutrofización progresiva hasta alcanzar condiciones hipertróficas, atribuida a actividades ganaderas, vertimiento de aguas residuales domésticas sin tratamiento y acumulación de residuos sólidos en las orillas del lago (22).

Por otro lado, cuando los pesticidas se aplican en altas concentraciones o en mezcla con otros agroquímicos, pueden generar efectos tóxicos directos sobre especies sensibles como *N. sphaericum*, interfiriendo en su metabolismo celular y capacidad fotosintética (18). En concordancia con ello, agricultores del distrito de San Pedro de Cajas han reportado que la disminución local del cushuro podría estar relacionada con la contaminación derivada del uso intensivo de pesticidas y fertilizantes en los cultivos de papa cercanos (Echenique, comunicación personal). Los agricultores de la zona indicaron que, por lo general, no siguen recomendaciones técnicas ni planes de manejo agroquímico, sino que utilizan productos sugeridos por vecinos o comprados previamente, sin conocer del todo su composición o efectos. Aunque no identificaron

marcas específicas, mencionaron el glifosato como uno de los pesticidas utilizados, lo que evidencia una falta de asesoramiento técnico y la persistencia de malas prácticas agronómicas.

Este tipo de prácticas no es exclusivo de San Pedro de Cajas. En el departamento de Junín, el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) ha reportado en 2021 la detección de pesticidas prohibidos o no autorizados para el cultivo de papa, incluyendo sustancias como metamidofos y paratión etílico, en campañas de vigilancia fitosanitaria (23). Estas situaciones reflejan deficiencias tanto en la fiscalización estatal como en la capacitación agraria local, y podrían estar afectando no solo la calidad del suelo y del agua, sino también a especies sensibles como *Nostoc sphaericum*. Así, las malas prácticas agronómicas continúan siendo un factor persistente en muchas zonas rurales altoandinas, con impactos potenciales sobre la salud humana, los ecosistemas y la biodiversidad microbiana.

La potencial desaparición de *Nostoc sphaericum* implica la pérdida de un recurso valioso, ya que es una cianobacteria rica en nitrógeno cuya presencia puede contribuir a mejorar la fertilidad natural del entorno (24). Este papel ecológico se debe a que la especie cumple funciones esenciales como la fijación de nitrógeno y la participación en el reciclaje de nutrientes. Además, su matriz mucilaginosa actúa como un agente aglutinante de las partículas del sustrato, lo que contribuye indirectamente a mejorar la estructura del suelo y aumentar su capacidad de retención hídrica (25).

Sin embargo, su hábitat está siendo alterado por otros factores además de los pesticidas. Desde inicios de la década del 2000, el creciente interés comercial por la maca ha impulsado su expansión acelerada, especialmente en regiones altoandinas como Junín, llegando a ocupar unas 8,000 hectáreas a nivel nacional con especial énfasis en la meseta de Junín y zonas adyacentes como San Pedro de Cajas (26). Esta expansión, impulsada por la alta demanda comercial (27), ha favorecido la ocupación de zonas ecológicamente frágiles incluidos bofedales y áreas propensas a su formación, ejerciendo una presión creciente sobre los ecosistemas altoandinos. La actividad intensiva asociada al cultivo acidifica el suelo, reduciendo su pH por debajo de 5, lo que limita la regeneración de los

ecosistemas acuáticos y favorece la solubilidad del aluminio (Al^{3+}), el cual puede ser absorbido por las raíces, afectando el desarrollo vegetal (28).

Esta acidificación es crítica, dado que las cianobacterias fijadoras de nitrógeno prosperan en un rango de pH entre 6 y 10 (29), y específicamente, *Nostoc sphaericum* crece óptimamente en un pH entre 7.5 y 8 (3). Adicionalmente, la agricultura intensiva afecta la disponibilidad de bicarbonato (HCO_3^-) en el sistema suelo-agua, porque las plantas cultivadas lo absorben desde la solución del suelo y lo transportan hacia sus brotes mediante la xilema, efecto que se acentúa en suelos calcáreos (30). Como consecuencia, tras la cosecha disminuye el HCO_3^- disponible en zonas encharcadas y humedales donde se desarrolla *N. sphaericum*. Dado que esta cianobacteria utiliza el bicarbonato como principal fuente de carbono inorgánico, y considerando la limitada disolución del CO_2 en altitudes elevadas por la menor presión parcial, la disponibilidad de carbono en el agua superficial se reduce aún más y puede restringir su crecimiento (31). Para compensar esta baja disponibilidad, *N. sphaericum* emplea enzimas como la anhidrasa carbónica, que catalizan la conversión del HCO_3^- en CO_2 intracelular, el cual es utilizado en la fotosíntesis (32).

Finalmente, en San Pedro de Cajas, donde la recolección y uso tradicional persisten, debe considerarse un posible riesgo sanitario: esta cianobacteria tiene la capacidad de bioacumular metales pesados como plomo (Pb) y cadmio (Cd), los cuales pueden provenir tanto de fuentes naturales como de actividades antrópicas, especialmente agrícolas e industriales (33,34).

Si bien no se dispone de datos específicos sobre la concentración de metales pesados en los suelos o cuerpos de agua de San Pedro de Cajas, estudios realizados en la cuenca del río Mantaro, cercana a la zona de estudio, reportan concentraciones de plomo superiores a 0.1 mg/L, muy por encima del límite máximo permitido para agua de consumo humano (0.01 mg/L) según los Estándares de Calidad Ambiental del Perú (35). Estos resultados evidencian procesos de contaminación regional que podrían afectar ecosistemas altoandinos vecinos donde se desarrolla *Nostoc sphaericum*.

Este tipo de transferencia podría ocurrir también en ecosistemas altoandinos como San Pedro de Cajas, no solo por actividades agrícolas sin prácticas de manejo sostenible, sino

también por procesos naturales como la escorrentía superficial y la lixiviación de minerales desde formaciones rocosas cercanas, especialmente durante lluvias intensas. Un estudio del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) en la subcuenca Pachacoto (2021) documenta que el drenaje ácido de roca puede originar niveles detectables de metales pesados (Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn) en ambientes similares, incluso en ausencia de contaminación agrícola directa (36). Por tanto, aunque no se disponga de datos locales directos, es prudente considerar el riesgo potencial de acumulación de metales pesados en *N. sphaericum*, tanto para fines alimentarios como ecológicos, particularmente en contextos de creciente presión agrícola y limitada fiscalización ambiental.

Aunque existen estudios sobre el valor nutricional (2, 3, 4, 8) y ecológico (24, 25) de *N. sphaericum*, la literatura científica es limitada en cuanto a los factores que regulan su distribución. Específicamente, pocos estudios han evaluado directamente cómo la expansión agrícola y el uso de pesticidas afectan su densidad en ecosistemas altoandinos. En San Pedro de Cajas, donde la agricultura intensiva convive con hábitats de cushuro, esta relación aún no ha sido estudiada sistemáticamente, lo cual constituye la justificación central y novedad de este trabajo.

Frente a la problemática expuesta y la brecha de conocimiento identificada, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la relación entre la proximidad a zonas agrícolas y centros poblados y la densidad poblacional de *Nostoc sphaericum*, analizando a su vez las características fisicoquímicas de su hábitat en los cuerpos de agua altoandinos de San Pedro de Cajas (37).

II. Hipótesis

Hipótesis Nula (H_0): No existe una relación significativa entre la distancia a los centros de cultivo agrícola y los centros poblados y la densidad poblacional de *Nostoc sphaericum* en los cuerpos de agua altoandinos del distrito de San Pedro de Cajas.

Hipótesis Alternativa (H_1): La densidad poblacional de *Nostoc sphaericum* en los cuerpos de agua altoandinos del distrito de San Pedro de Cajas disminuye significativamente a

menor distancia (mayor cercanía) de los centros de cultivo agrícola y los centros poblados.

III. Pregunta de investigación:

3.1 Problema general

- ¿Cómo varía la densidad poblacional de la cianobacteria *Nostoc sphaericum* en el distrito de San Pedro de Cajas en función de la distancia a los centros de cultivo agrícola y a los centros poblados?

3.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la densidad poblacional y el diámetro promedio de *Nostoc sphaericum* en los cuerpos de agua altoandinos del distrito de San Pedro de Cajas durante la temporada seca y la temporada de lluvia?
- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua de los cuerpos de agua altoandinos donde se desarrolla *Nostoc sphaericum* durante la temporada seca y la temporada de lluvia en el distrito de San Pedro de Cajas?
- ¿Cuál es la relación entre los usos del suelo cercanos y las características del hábitat y la presencia de *Nostoc sphaericum* en los puntos de muestreo?

IV. Objetivo

4.1 Objetivo general

- Evaluar la variación espacial y estacional de la densidad poblacional y del diámetro de las colonias de *Nostoc sphaericum* en cuerpos de agua altoandinos del distrito de San Pedro de Cajas, así como su relación con la proximidad a áreas de cultivo, el uso del suelo circundante y las características fisicoquímicas del agua.

4.2 Objetivo específico

- Determinar la densidad poblacional y el diámetro promedio de las colonias de *Nostoc sphaericum* durante la temporada seca y la temporada lluviosa en los cuerpos de agua altoandinos del distrito de San Pedro de Cajas.
- Analizar y comparar las características fisicoquímicas del agua en los cuerpos de agua altoandinos donde se desarrolla *Nostoc sphaericum* durante la temporada seca y la temporada lluviosa en el distrito de San Pedro de Cajas.
- Caracterizar el uso del suelo en las áreas cercanas a los puntos de muestreo de *Nostoc sphaericum* (incluida la presencia de áreas de cultivo) y evaluar su posible influencia sobre los cuerpos de agua altoandinos del distrito de San Pedro de Cajas.

V. Materiales y método

5.1 Puntos de colecta

Las muestras de cianobacterias de la especie *Nostoc sphaericum* fueron recolectadas en lagunas y bofedales del distrito de San Pedro de Cajas, departamento de Junín. El trabajo de campo se realizó en dos campañas, correspondientes a la temporada seca (agosto de 2022) y la temporada lluviosa (febrero de 2023). Estas zonas no se encuentran bajo protección del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) ni de otras entidades de conservación.



Figura 1. Lugares donde se encontraron *Nostoc sphaericum*, (1: Roca (Anexo 2), 2: Ladera (Anexo 1), 3: Parpacocha (Anexo 3) y donde no se encontró (4: Laguna alcacocha, 5: Laguna 1, 6: Gallinero (Anexo 5)

5.1.1 Recolección de muestras

La recolección de *Nostoc sphaericum* se realizó en zonas periféricas de cuerpos de agua altoandinos (lagunas, riachuelos y bofedales), seleccionando puntos de muestreo de manera aleatoria dentro de hábitats típicos para la especie. El muestreo se llevó a cabo en dos campañas: temporada seca (agosto de 2022) y temporada lluviosa (febrero de 2023). En la temporada seca se establecieron y marcaron los puntos de muestreo, registrándose la ausencia del organismo; en la temporada lluviosa se efectuó la recolección en los tres sitios de referencia donde se encontró presencia: Ladera, Parpacocha y Roca.

Adicionalmente, para cada punto de muestreo se registró la distancia a la vivienda rural más cercana y al campo agrícola más cercano (en metros), como aproximación a la influencia antrópica. Estas distancias se incorporaron en los análisis junto con las variables fisicoquímicas del agua y las métricas poblacionales de *N. sphaericum*.

En cada punto con presencia de la cianobacteria se realizaron tres extracciones independientes, separadas manualmente con ayuda de un colador y colocadas en frascos esterilizados por separado. Cada frasco se procesó y contabilizó de manera independiente; sin embargo, estas extracciones se consideraron submuestras del mismo punto (no réplicas independientes). Por ello, para los análisis se integró la información a nivel de punto de muestreo (p. ej., sumando los conteos entre frascos para obtener un total por punto y utilizando todas las mediciones de diámetro del punto para calcular un valor resumen). Junto con las muestras biológicas, se recolectaron aproximadamente 100 mL de agua del mismo punto para los análisis fisicoquímicos. En los puntos donde no se encontró *N. sphaericum*, se recolectó únicamente agua para su análisis comparativo.

En total, se establecieron y muestrearon 5 puntos en el sitio de Roca (pozas rocosas), 9 puntos en Ladera (bofedal) y 9 puntos en Parpacocha (bofedal). Debido a que *N. sphaericum* no se registró en todos los puntos durante la temporada lluviosa y a que algunas muestras presentaron limitaciones de calidad (p. ej., contaminación con sedimento que afectó la confiabilidad de ciertas mediciones fisicoquímicas), el número

final de puntos (N) utilizados varió según el análisis, considerando como unidad muestral el punto de muestreo:

- Análisis fisicoquímicos (dureza y alcalinidad): Se utilizaron N=9 puntos en Parpacocha, N=4 en Ladera y N=1 en Roca (debido a contaminación con sedimento en las muestras restantes). Para pH, sólidos disueltos totales (TDS) y conductividad se utilizaron N=5 puntos en Roca, N=9 en Ladera y N=9 en Parpacocha..
- Análisis de densidad: Se utilizaron N=5 puntos en Roca, N=9 en Ladera y N=9 en Parpacocha, asignando densidad cero a los puntos donde no se registró presencia de *N. sphaericum*.
- Análisis de diámetro: Se incluyeron únicamente los puntos con presencia de *N. sphaericum*, resultando en N=2 para Roca, N=5 para Ladera y N=4 para Parpacocha. En cada punto incluido, el diámetro se midió en todas las colonias presentes, calculándose un valor resumen por punto (p. ej., diámetro promedio).

5.1.2 Medición de parámetros fisicoquímicos *in situ*

Durante la colecta descrita, se midieron *in situ* los parámetros fisicoquímicos del agua utilizando un multiparámetro portátil (APERA Instruments®). Se registraron los valores de pH, potencial de óxido-reducción (mV), conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos (TDS).

En cada sitio de muestreo se realizaron tres mediciones independientes por temporada para obtener un registro robusto de las condiciones del agua. La ubicación geográfica de cada sitio fue registrada en campo mediante un geoposicionador (GPS). Posteriormente, estas coordenadas se utilizaron para documentar y referenciar los sitios evaluados, empleando herramientas como Google Maps® para su visualización.

5.2 conteo y medición de cianobacterias

El conteo y la medición de *Nostoc sphaericum* se adaptaron a las condiciones del terreno y a la morfología macroscópica del organismo. El conteo se realizó de forma manual, utilizando como unidad de registro operativa cada “agregado visible”, definido como una macrocolonia mucilaginosa de forma esferoidal o lobulada. El diámetro de las colonias se midió de manera individual con un calibrador Vernier (Stanley®, USA), con resolución y precisión de $\pm 0,05$ mm.

En cada punto de muestreo con presencia de *N. sphaericum* se realizaron tres extracciones independientes, conservadas en frascos separados. El conteo de agregados se efectuó por frasco y posteriormente se integró a nivel de punto de muestreo, sumando los conteos de los frascos para obtener el número total de agregados por punto. De forma similar, el diámetro se midió en todas las colonias registradas en cada punto, calculándose un valor resumen por punto (p. ej., diámetro promedio) para los análisis comparativos.

Dado que los hábitats muestreados (bordes de bofedales y pozas rocosas) son espacialmente heterogéneos y presentan geometrías irregulares, los métodos estándar de densidad por unidad de área (m^2) o por volumen (mL) no resultaron aplicables. Por ello, se estimó una densidad lineal relativa, calculada como el número total de agregados por punto dividido entre la longitud lineal muestreada correspondiente al borde del sector evaluado (38). Para estimar dicha longitud, el contorno del borde evaluado en cada punto se delimitó siguiendo su forma mediante un pabilo; posteriormente, el pabilo se retiró y su longitud se midió con una cinta métrica. Esta aproximación permitió obtener una medida estandarizada expresada como agregados $\cdot cm^{-1}$, adecuada para comparar cuerpos de agua con bordes irregulares.

5.3 Análisis fisicoquímicos

Los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio 204 el cual se llama “Transformación de plantas” de los Laboratorios de investigación y desarrollo (LID) de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

5.3.1 Determinación de nitrato y fosfatos

Para la medición de fosfatos se emplearon 10 mL de muestra y el reactivo HI3833-0 (Phosphate Reagent, HANNA Instruments®). Para los nitratos, se utilizaron 5 mL de muestra con el reactivo HI3874-0 (Nitrate Reagent, HANNA Instruments®), siguiendo el protocolo estándar de cada kit.

5.3.2 Determinación de alcalinidad

Se utilizó el Kit Test Alkalinity con reactivo HI3811 (HANNA Instruments®) y 5 mL de muestra por análisis, según las instrucciones del fabricante.

5.3.3 Determinación de dureza total

Para la evaluación de la dureza total se utilizó el Kit Test Hardness con el reactivo HI3812 (HANNA Instruments®), empleando 10 mL de muestra por prueba.

5.3.4 Mediciones auxiliares

Las distancias lineales entre los sitios de muestreo y las áreas de influencia antrópica (viviendas y campos de cultivo) se determinaron mediante Google Earth Pro®. En particular, se midió la distancia desde cada punto de evaluación hasta la vivienda y/o el borde del campo de cultivo más próximo, con el fin de obtener una medida estandarizada de cercanía a estas fuentes potenciales de alteración.

Adicionalmente, Adicionalmente, se incorporaron tres puntos georreferenciados sin registro de *Nostoc sphaericum* durante la campaña (Gallinero, Laguna 1 y Laguna Alcacocha) como puntos de referencia ambiental. En estos sitios se registraron las mismas variables empleadas en los demás puntos (pH, sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y demás parámetros fisicoquímicos del agua), así como la ubicación y las distancias a viviendas y áreas de cultivo. Su inclusión permitió ampliar el gradiente ambiental evaluado e incorporar condiciones de hábitat contrastantes, dado que estos cuerpos de agua presentaban características físicas distintas a los sitios con presencia (p. ej., ausencia de bofedales asociados y orillas predominantemente arenosas). Estos puntos se utilizaron en el análisis espacial y en el agrupamiento jerárquico para

comparar similitudes y diferencias ambientales entre sitios con y sin registro del organismo, y no fueron considerados en los análisis de densidad ni de diámetro.

5.4 Análisis estadísticos

Para el tratamiento de los datos se empleó RStudio® (versión 4.3.0), utilizando los paquetes estadísticos stats, ggplot2, lme4 y car.

Previamente a los análisis comparativos, se verificaron los supuestos estadísticos de normalidad (prueba de Shapiro–Wilk, $\alpha = 0.05$) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). Dado que los tamaños de muestra por grupo eran pequeños y desiguales (ver sección 4.1.1), se tuvo especial consideración al evaluar estos supuestos y al elegir la prueba estadística. Cuando ambos supuestos se cumplieron razonablemente, se aplicaron pruebas paramétricas (análisis de varianza - ANOVA, prueba *post hoc* de Tukey). Sin embargo, en los casos donde alguno de los supuestos no se cumplió o cuando la robustez de la prueba paramétrica era cuestionable debido a los bajos N (e.g., N=1 o N=2 en algunos análisis), se recurrió a pruebas no paramétricas equivalentes (prueba de Wilcoxon Rank Sum, prueba de Kruskal–Wallis) para confirmar o reemplazar los resultados.

Para identificar relaciones entre las variables ambientales (pH, conductividad, temperatura, TDS, alcalinidad, dureza, nitratos y fosfatos) se efectuó un análisis de correlación. Posteriormente, se aplicó una regresión lineal múltiple (MLR) para cuantificar el efecto conjunto de estas variables sobre la densidad poblacional.

Finalmente, para modelar la estructura jerárquica de los datos y separar la variabilidad entre y dentro de los cuerpos de agua, se ajustó un modelo lineal mixto (MLM) utilizando el paquete lme4 (39). Este modelo permitió incorporar efectos fijos (las variables ambientales) y efectos aleatorios (la variabilidad entre cuerpos de agua), facilitando una estimación más robusta de los factores que influyen sobre la densidad de *N. sphaericum*.

Además, se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico (método UPGMA, distancia euclidiana) aplicado a los datos transformados mediante Box–Cox. Se excluyó de este

análisis específico un punto de muestreo perteneciente al sitio de Ladera que presentó una densidad de 1 agregado·cm⁻¹, por considerarse un valor atípico extremo que distorsionaba la estructura general de los clústeres. Este procedimiento permitió explorar la similitud espacial entre los puntos de muestreo restantes considerando las variables distancia a viviendas, distancia a campos agrícolas y densidad de *N. sphaericum*, generando dendrogramas comparativos.

VI. Resultados

6.1 Hallazgo estacional

El primer hallazgo determinante fue la marcada estacionalidad de *Nostoc sphaericum*. Durante la campaña de temporada seca (agosto de 2022) se evaluaron 23 puntos de muestreo (Roca = 5, Ladera = 9 y Parpacocha = 9) y no se registró presencia del organismo en ninguno de ellos (0/23). En contraste, durante la campaña de temporada lluviosa (febrero de 2023) se registró presencia en 11/23 puntos, correspondientes a 2/5 en Roca, 5/9 en Ladera y 4/9 en Parpacocha, evidenciando que la ocurrencia del organismo se restringe al periodo de mayor disponibilidad hídrica.

En los puntos con registro durante la temporada lluviosa, el conteo total de agregados por punto (suma de frascos) fue heterogéneo, variando entre 5 y 176 agregados por punto. En consecuencia, los análisis que dependen de la presencia del organismo (densidad y diámetro) se desarrollan con base en la campaña lluviosa, y sus resultados cuantitativos se presentan en la sección 7.3. Asimismo, durante la campaña seca la disponibilidad de agua fue limitada (bofedales sin lámina de agua y lagunas/riachuelos con volumen o caudal muy reducido), por lo que las comparaciones fisicoquímicas se basan principalmente en las mediciones realizadas en la temporada lluviosa. En esta campaña, la categoría “sin registro” incluye tanto los puntos sin detección dentro de Roca, Ladera y Parpacocha como los puntos de referencia sin registro (Gallinero, Laguna 1 y Laguna Alcacocha), incorporados para ampliar el contraste ambiental y el análisis espacial y de agrupamiento.

temporada.

6.2 Propiedades fisicoquímicas

Las relaciones entre las variables fisicoquímicas del agua se evaluaron mediante una matriz de correlación (Figura 2), considerando el potencial de óxido-reducción (mV), los sólidos disueltos totales (TDS), la conductividad eléctrica y el pH.

En ausencia de *Nostoc sphaericum* (Figura 2A), se observaron asociaciones moderadas entre el potencial redox, los TDS y la conductividad, variables todas relacionadas con la concentración iónica del agua. En cambio, el pH mostró una correlación inversa con el potencial redox, lo que refleja la relación esperada entre ambos parámetros.

Cuando *N. sphaericum* estuvo presente (Figura 2B), las correlaciones entre las variables ambientales se debilitaron notablemente, sin evidenciar asociaciones significativas.

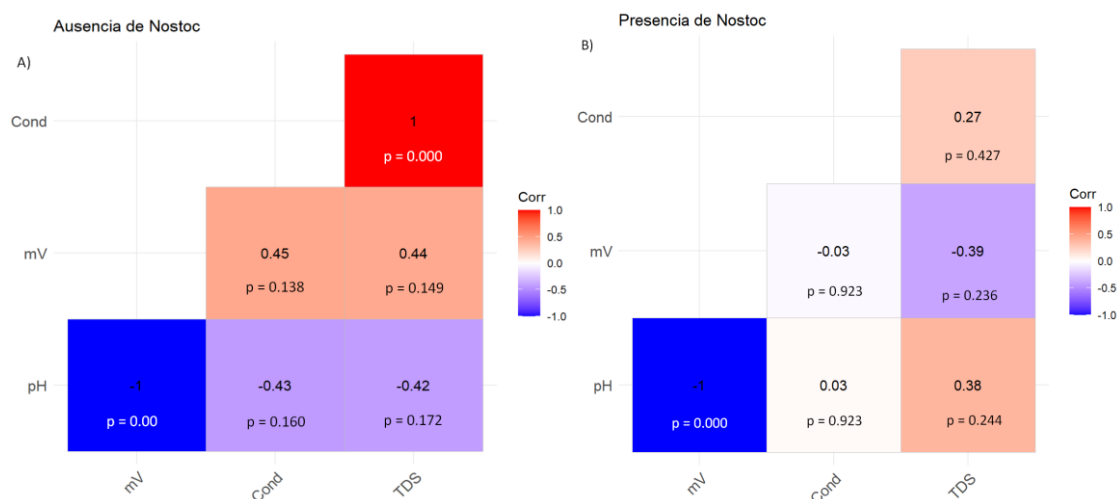


Figura 2. Mapa de correlación entre variables “sin presencia” (A) y “con presencia” (B)

Los diagramas de caja (Figura 3) muestran la distribución de las tres variables fisicoquímicas analizadas pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (TDS) en sitios con y sin presencia de *Nostoc sphaericum*. En la Figura 3A, se visualiza la distribución del pH mediante diagramas de caja, utilizando la mediana como medida robusta de tendencia central para mantener la consistencia en la comparación con otras variables como los TDS (que no siguieron una distribución normal). Aunque visualmente las medidas centrales del pH fueron similares entre sitios con y sin presencia, la diferencia no fue estadísticamente significativa ($t = -0.811$, $gl = 21$, $p = 0.427$; medias: 7.08 con presencia y 7.41 sin presencia). De manera similar, la conductividad eléctrica

(Figura 3B) no mostró diferencias significativas entre ambos grupos ($t = -0.585$, $gl = 21$, $p = 0.565$; medias: $384.09 \mu\text{S/cm}$ con presencia y $454.43 \mu\text{S/cm}$ sin presencia).

En contraste, los sólidos totales disueltos (Figura 3C) mostraron una diferencia estadísticamente significativa entre ambos grupos (Wilcoxon $W = 27$, $p = 0.016$). Al reportar esta variable con medidas robustas, los sitios con presencia presentaron valores menores (mediana = 16.90 ppm ; RIQ = $2.63\text{--}206.00$) que los sitios sin presencia (mediana = 272.50 ppm ; RIQ = $200.50\text{--}464.50$). De forma complementaria, las medias \pm DE también reflejan esta tendencia ($136.02 \pm 187.28 \text{ ppm}$ con presencia vs $328.02 \pm 198.80 \text{ ppm}$ sin presencia), lo que sugiere que *N. sphaericum* tiende a desarrollarse en ambientes con menor concentración de sólidos disueltos, posiblemente asociados a aguas con menor carga iónica o menor grado de mineralización.

La verificación de supuestos estadísticos (Shapiro–Wilk y Levene; ver Métodos) mostró que los datos de TDS con presencia no siguieron una distribución normal ($p = 0.003$), mientras que las demás variables, incluyendo el pH, cumplieron dicho supuesto ($p > 0.05$). La homogeneidad de varianzas se confirmó en todos los casos ($p > 0.05$). En conjunto, estos resultados sugieren que la presencia de *Nostoc sphaericum* no está asociada con variaciones significativas en el pH ni en la conductividad, pero sí con menores valores de TDS, lo cual podría reflejar su preferencia por aguas menos mineralizadas o con menor contenido de iones disueltos.

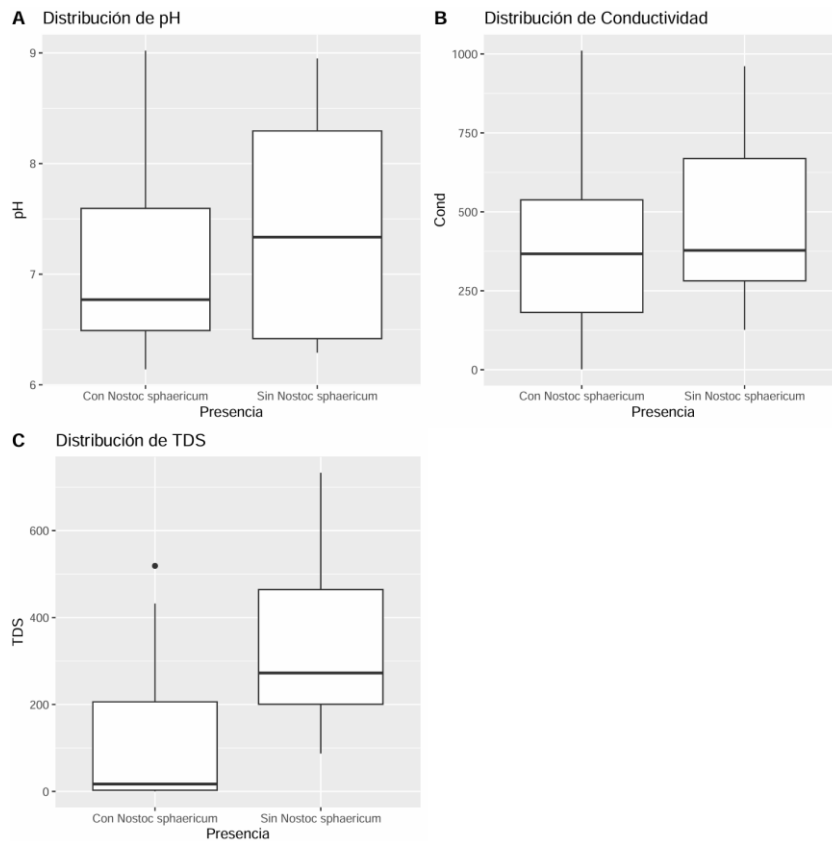


Figura 3. Distribución de las propiedades fisicoquímicas del agua en “presencia” y “sin presencia” de *N. sphaericum*. A) Distribución de pH, B) Distribución de Conductividad, C) Distribución de TDS

Los valores de dureza y alcalinidad se analizaron considerando todas las muestras recolectadas en cada sitio de muestreo, independientemente de la presencia o ausencia de *Nostoc sphaericum*, con el fin de caracterizar las condiciones generales del agua en el área de estudio.

El análisis de la composición química del agua mostró diferencias leves entre sitios, siendo la alcalinidad la única variable con diferencias estadísticamente significativas. En el caso de la dureza (Figura 4A), los valores promedio oscilaron entre 180 y 220 mg/L, registrándose las medias más altas en Roca (≈ 220 mg/L) y ligeramente menores en Ladera y Parpacocha ($\approx 185\text{--}190$ mg/L). No obstante, el ANOVA no evidenció diferencias significativas entre sitios ($F(2,11) = 0.321$; $p = 0.732$), lo que indica una composición relativamente homogénea respecto a este parámetro.

En contraste, la alcalinidad (Figura 4B) presentó diferencias significativas entre sitios (ANOVA: $F(2,11) = 4.699$; $p = 0.033$; Kruskal–Wallis: $\chi^2 = 6.461$; $p = 0.040$). Los valores promedio fueron de aproximadamente 63 mg/L en Parpacocha, 45 mg/L en Roca y 35 mg/L en Ladera. Estos resultados sugieren que Parpacocha presenta aguas más alcalinas. En cambio, al comparar la alcalinidad entre sitios con y sin presencia de *N. sphaericum*, no se observaron diferencias significativas ($t = -0.855$, $gl = 9.316$, $p = 0.414$).

Las pruebas de supuestos respaldaron el uso del ANOVA: para dureza, la normalidad de residuos no mostró desviaciones marcadas (Shapiro–Wilk $p = 0.150$) y la homogeneidad de varianzas fue compatible (Levene $p = 0.724$); para alcalinidad, los residuos cumplieron normalidad (Shapiro–Wilk $p = 0.960$) y la homogeneidad de varianzas también fue aceptable (Levene $p = 0.268$). Finalmente, la correlación entre dureza y alcalinidad fue baja y no significativa (Spearman $\rho = 0.266$, $p = 0.358$). En conjunto, los resultados muestran que la alcalinidad tiende a variar de forma más marcada entre sitios, mientras que la dureza se mantiene relativamente estable en el área de estudio. Asimismo, se detectaron concentraciones bajas de nutrientes inorgánicos, como nitratos (< 10 ppm) y fosfatos (< 1 ppm), en todas las muestras analizadas, lo que sugiere ambientes oligotróficos (bajos en nutrientes), característicos de los ecosistemas altoandinos donde prospera *Nostoc*."

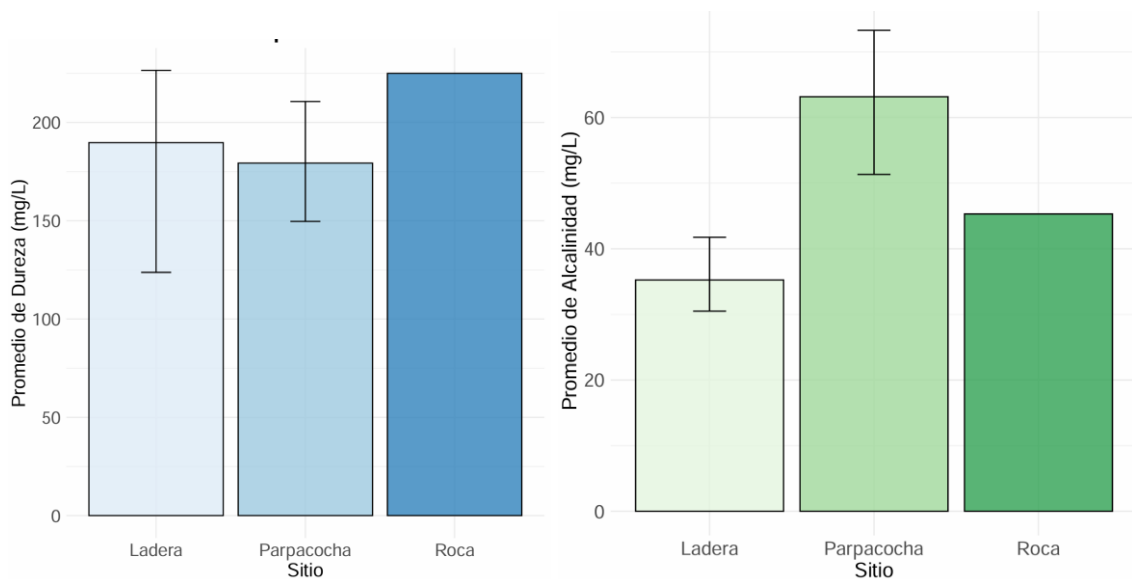


Figura 4. Valores de dureza (A) y alcalinidad (B) del agua registrados en los sitios de Ladera (N=4), Parpacocha (N=9) y Roca (N=1). Para Ladera y Parpacocha, las barras

representan el promedio y las líneas verticales el error estándar de la media. Para Roca, la barra representa el único valor medido (N=1).

El análisis de regresión lineal simple mostró una relación positiva y significativa entre los TDS y la alcalinidad ($F(1,12) = 9.963$; $p = 0.008$; $R^2 = 0.454$). La pendiente del modelo fue $\beta = 0.061 \pm 0.019$ (SE), con un intercepto de 39.54 ± 6.05 , indicando que por cada incremento de 1 ppm en TDS, la alcalinidad aumenta en promedio 0.061 mg L^{-1} . El coeficiente de correlación de Pearson ($r = 0.674$) y la correlación de Kendall ($\tau = 0.442$; $p = 0.032$) confirmaron esta asociación positiva. En conjunto, estos resultados sugieren que la alcalinidad del agua aumenta proporcionalmente con la mineralización, representada por el contenido de TDS.

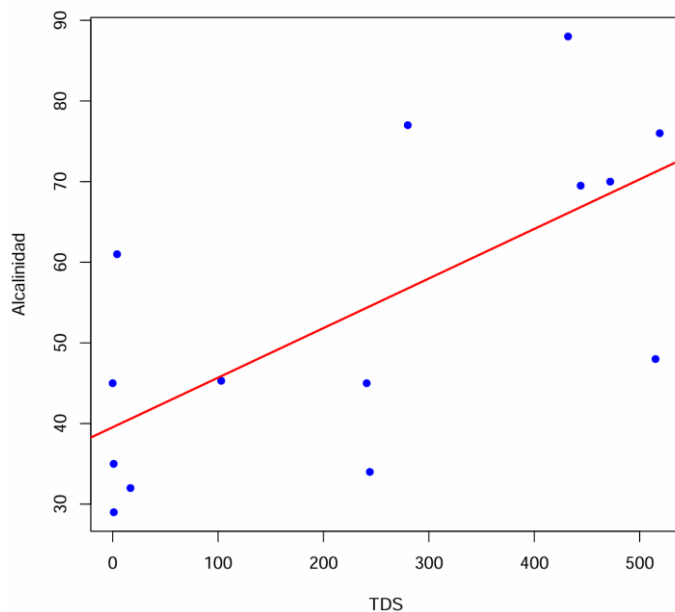


Figura 5. Relación entre los sólidos totales disueltos (TDS) y la alcalinidad del agua en los sitios de muestreo.

El análisis comparativo de los sólidos totales disueltos (TDS) y la alcalinidad entre los sitios con y sin presencia de *Nostoc sphaericum* mostró diferencias contrastantes. Como se indicó en la Figura 3C, los valores de TDS fueron significativamente menores en los sitios con presencia de *N. sphaericum* que en aquellos sin presencia (Wilcoxon $W = 27$, $p = 0.016$).

Para evaluar si el efecto de la presencia de *N. sphaericum* sobre los TDS era dependiente del sitio (Figura 6), se buscó aplicar un análisis de varianza de dos vías (Lugar × Presencia). Sin embargo, la prueba de Levene detectó heterogeneidad de varianzas ($p = 0.024$), invalidando un supuesto clave para el ANOVA estándar. Por este motivo, se recurrió a la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis para evaluar los grupos combinados. Esta prueba confirmó que existían diferencias significativas entre los grupos ($\chi^2 = 15.491$; $gl = 5$; $p < 0.010$).

En conjunto, estos resultados refuerzan la idea de que *N. sphaericum* prospera en ambientes de baja mineralización (bajos TDS) y sugieren que los contrastes en TDS varían según el cuerpo de agua, con diferencias más marcadas en algunos sitios.

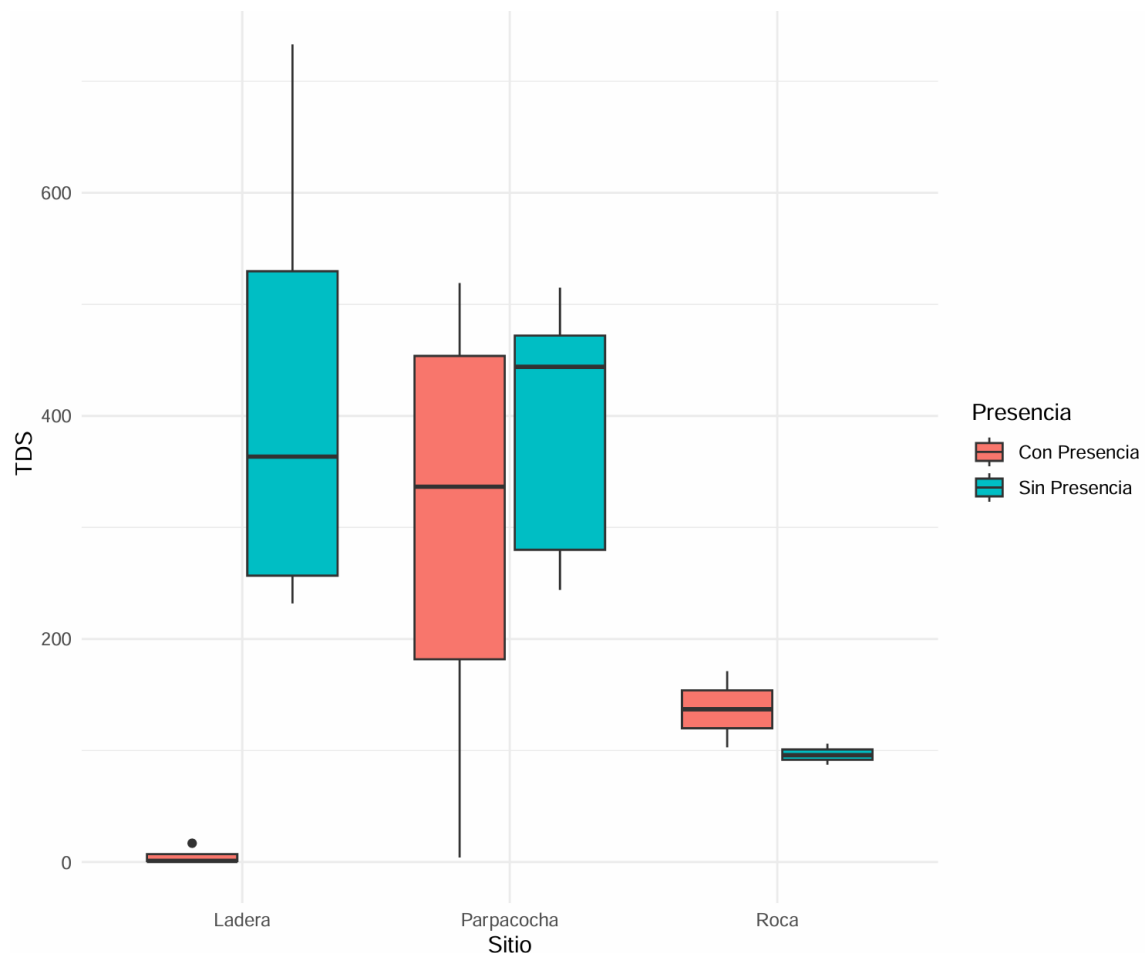


Figura 6. Efecto de la presencia de *Nostoc sphaericum* y de los sitios sobre los valores de sólidos totales disueltos (TDS).

6.3 Diámetro y Densidad

El diámetro promedio de *Nostoc sphaericum* varió entre las tres sitios evaluados (Roca, Ladera y Parpacocha) (Figura 7). Los mayores valores promedio se registraron en Roca (≈ 3.5 mm), seguidos de Ladera (≈ 3.1 mm) y Parpacocha (≈ 2.2 mm).

El análisis de varianza (ANOVA) indicó que las diferencias entre sitios no fueron estadísticamente significativas ($F(2, 8) = 3.102$; $p = 0.101$). Las comparaciones post hoc mediante la prueba de Tukey confirmaron la ausencia de diferencias significativas entre pares de sitios ($p > 0.100$ para todas las comparaciones), aunque se observó una tendencia a mayores diámetros en Roca respecto a Parpacocha ($p = 0.115$).

Además, se evaluó la posible relación del diámetro con parámetros fisicoquímicos del agua. La regresión lineal múltiple con pH y TDS como variables predictoras no resultó significativa ($F = 1.219$; $p = 0.348$; R^2 ajustado = 0.040), indicando que ninguno de estos factores explicó de manera importante la variación observada en el tamaño de las colonias. Las correlaciones de Pearson mostraron una relación positiva débil entre el diámetro y el pH ($r = 0.345$) y negativa con los TDS ($r = -0.181$).

En conjunto, aunque se aprecia una ligera tendencia a diámetros mayores en los sitios rocosos, la variabilidad dentro de cada grupo fue elevada, con desviaciones estándar de 0.21 mm en Roca (N=2), 0.78 mm en Ladera (N=5) y 0.44 mm en Parpacocha (N=4), lo que sugiere que otros factores ambientales o microestructurales no medidos podrían influir significativamente en la variación observada.

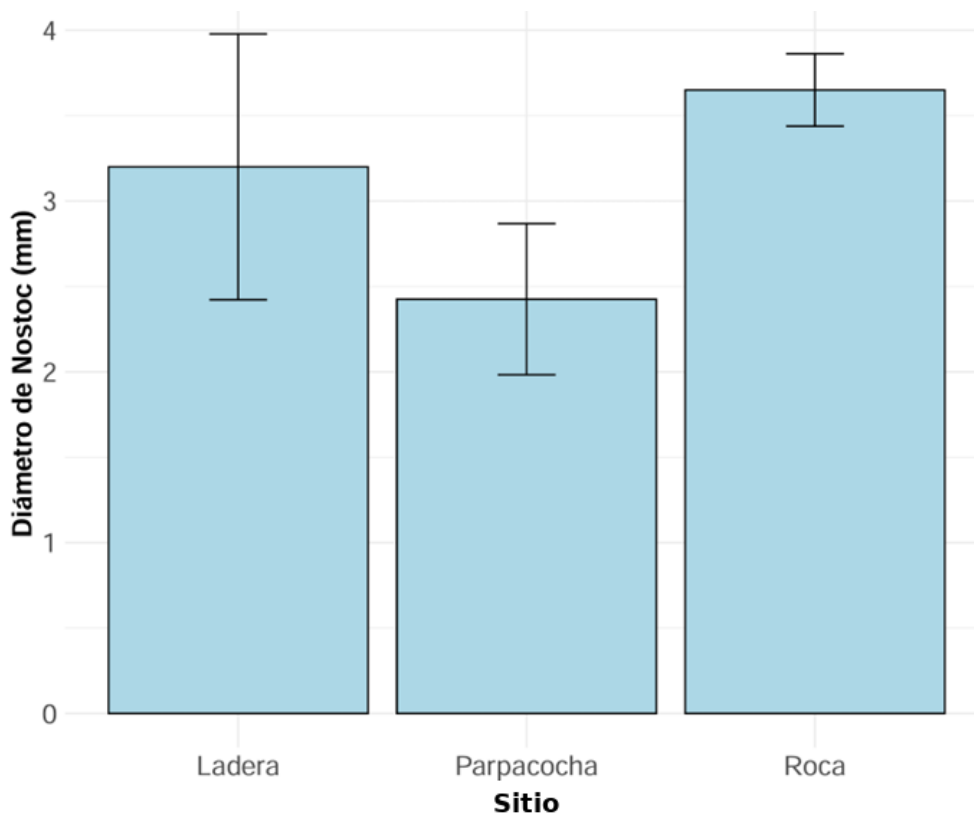


Figura 7. Diámetro promedio de *Nostoc sphaericum* en Ladera, Parpacocha y Roca. Las barras representan el error estándar de la media.

La Figura 8 muestra la relación entre el diámetro promedio de *Nostoc sphaericum* y dos variables fisicoquímicas del agua: el pH (A) y los sólidos disueltos totales (TDS) (B), evaluadas en los sitios de Ladera, Parpacocha y Roca. En general, se observó que la dirección y magnitud de las relaciones varían según el tipo de microhábitat. En Ladera, el diámetro de *N. sphaericum* disminuyó conforme aumentó el pH y los TDS, mientras que en Parpacocha ambas variables mostraron una relación positiva con el tamaño de las colonias. En Roca, la tendencia fue también positiva, aunque con menor número de observaciones.

El análisis estadístico mediante un modelo ANCOVA ($F(4,6) = 1.676$; $p = 0.272$; $R^2 = 0.528$) no mostró efectos significativos del pH, TDS ni del lugar de muestreo sobre el diámetro de *N. sphaericum*. Tampoco se detectaron interacciones significativas entre las variables ($p > 0.194$), lo que indica que la variación observada se debe principalmente a diferencias locales o microambientales no explicadas por el modelo.

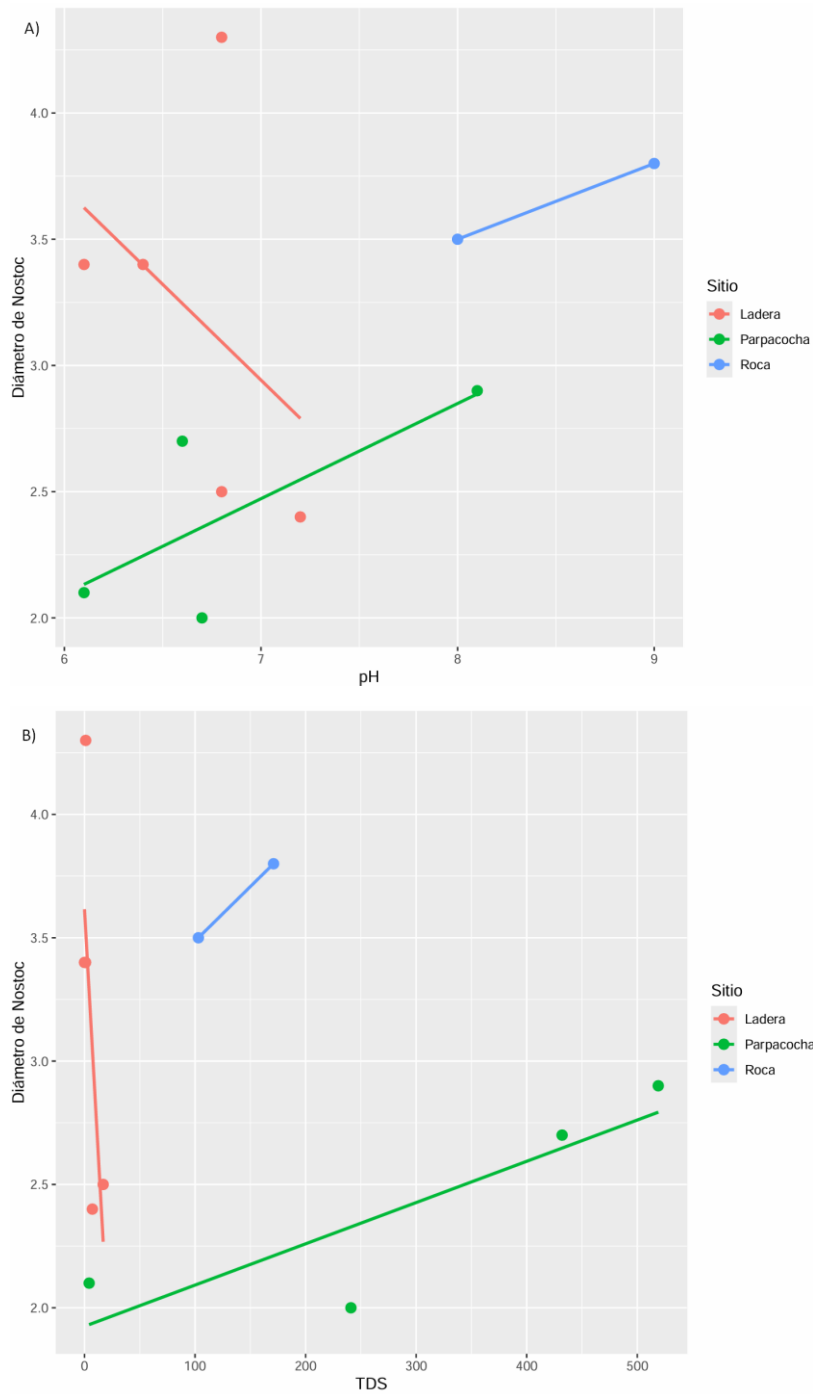


Figura 8. Relación entre el diámetro de *Nostoc sphaericum* y las variables fisicoquímicas del agua: (A) pH y (B) sólidos disueltos totales (TDS), en los sitios de Ladera, Parpacocha y Roca. Las líneas representan las tendencias lineales ajustadas por sitio.

La densidad lineal de *Nostoc sphaericum* presentó variaciones claras entre los tres sitios evaluados (Roca, Parpacocha y Ladera) (Figura 9). En términos descriptivos, Roca registró las mayores densidades, con valores que oscilaron entre aproximadamente 50 y 170 agregados·cm⁻¹ (mediana ≈ 110 agregados·cm⁻¹). Parpacocha presentó valores intermedios, entre 10 y 50 agregados·cm⁻¹ (mediana ≈ 30 agregados·cm⁻¹). En Ladera se observaron las densidades más bajas, próximas a 0 agregados·cm⁻¹, con algunos valores puntuales más altos. Antes de la estandarización por perímetro, el conteo total de agregados por punto (suma de frascos) también evidenció alta heterogeneidad: en Roca se registraron 160 y 24 agregados (n=2 puntos con registro), en Ladera 19, 7, 9, 111 y 5 (n=5), y en Parpacocha 176, 115, 10 y 71 (n=4).

En el análisis inferencial se observó evidencia de diferencias entre sitios, aunque con resultados sensibles al método de prueba. El ANOVA mostró un resultado marginalmente significativo ($F(2, 8) = 4.350$; $p = 0.052$) con un tamaño del efecto elevado ($\eta^2 = 0.520$), lo que sugiere que el tipo de microhábitat podría explicar una proporción considerable de la variabilidad observada. La prueba post hoc de Tukey evidenció una diferencia entre Roca y Ladera (diferencia media = 102.8 agregados·cm⁻¹; IC 95 %: 2.00–203.60; $p = 0.046$), mientras que las comparaciones Roca–Parpacocha y Parpacocha–Ladera no mostraron diferencias significativas ($p > 0.100$). Para evaluar la robustez ante posibles desviaciones de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, que mostró un patrón similar, aunque sin alcanzar significancia estadística ($\chi^2 = 4.725$; $p = 0.094$).

En conjunto, los resultados respaldan una mayor densidad de *N. sphaericum* en sitios rocosos (Roca) en comparación con Ladera y, en menor medida, con Parpacocha, lo que sugiere que las condiciones del microhábitat (p. ej., sustrato rocoso y zonas de refugio) podrían favorecer una mayor acumulación de agregados en los bordes muestreados.

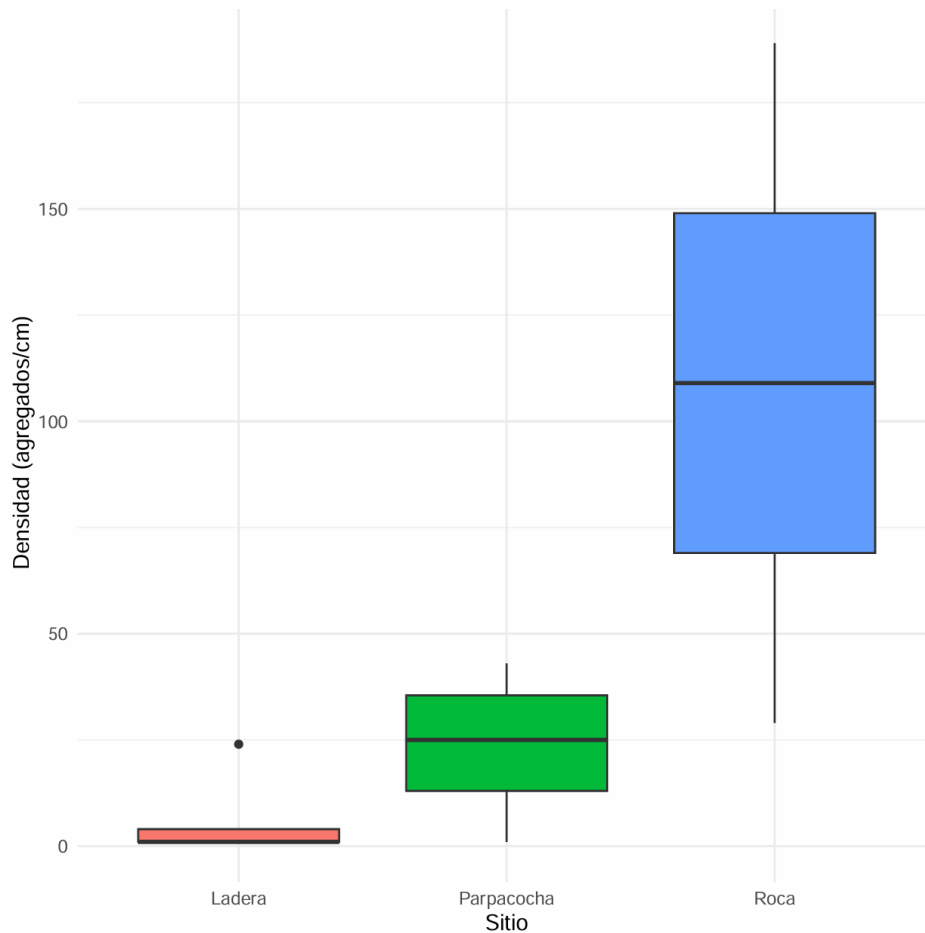


Figura 9. Distribución de la densidad de *N. sphaericum* encontrado en cada sitio (Ladera, Parpacocha, Roca)

Los dendrogramas de la Figura 10 muestran el agrupamiento jerárquico (UPGMA) de los puntos de muestreo individuales en función de su similitud, considerando únicamente dos variables: la distancia (a viviendas rurales en A, y a campos agrícolas en B) y la densidad de *Nostoc sphaericum*. El análisis se realizó con distancia euclidiana y datos transformados mediante Box-Cox. En esta figura, las etiquetas con números (p. ej., “Ladera 1–5”, “Parpacocha 1–3”, “Roca 1–2”) corresponden a réplicas/puntos dentro de cada lugar, por lo que no representan localidades diferentes, sino unidades de muestreo independientes.

En la Figura 10A (Casas + Densidad), los puntos “Laguna 1” y “Laguna Alcacocha” se agrupan estrechamente y se diferencian del conjunto principal; “Gallinero” aparece como un punto relativamente aislado, uniéndose al resto a mayor distancia. En el conjunto principal, varios puntos de Ladera y Parpacocha tienden a agruparse entre sí,

mientras que Roca se mantiene relativamente diferenciado, consistente con un microhábitat rocoso con presencia del organismo. Este patrón sugiere que los puntos clasificados como “Sin presencia” (Laguna 1, Laguna Alcacocha y Gallinero) se distinguen principalmente por su densidad nula, además de su posición relativa respecto a viviendas.

En la Figura 10B (Campos + Densidad), “Gallinero”, “Laguna 1” y “Laguna Alcacocha” conforman un grupo claramente diferenciado, reforzando que estos puntos sin presencia se separan del resto cuando se considera la distancia a campos agrícolas. En contraste, los puntos de Ladera y Parpacocha muestran mayor similitud entre sí, mientras que Roca conserva una tendencia a agruparse de forma más independiente. En conjunto, los dendrogramas sugieren que la variación en densidad de *N. sphaericum* se organiza en función del tipo de punto muestreado, y que los puntos sin presencia se separan consistentemente del resto, independientemente de si la distancia considerada es a viviendas o a campos agrícolas.

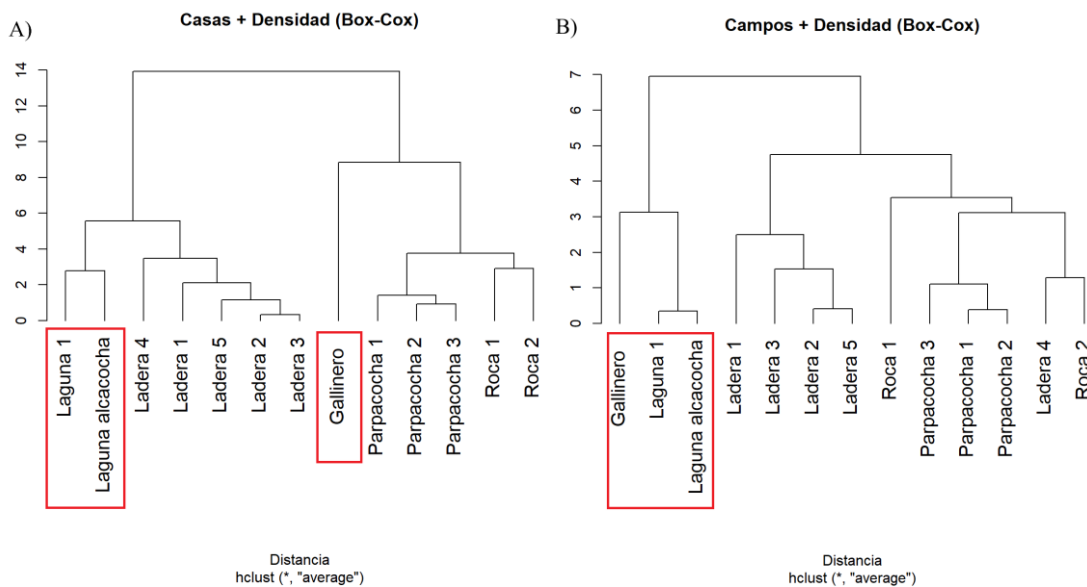


Figura 10. Dendrogramas de agrupamiento jerárquico (UPGMA) de puntos de muestreo basados en la distancia a casas (A) y a campos agrícolas (B), y en la densidad de *Nostoc sphaericum*. Los datos fueron transformados mediante Box-Cox.

La Figura 11 muestra la relación entre la densidad de *Nostoc sphaericum* y la distancia a campos de cultivo (izquierda) y viviendas rurales (derecha). En general, la densidad fue baja en la mayoría de los sitios, observándose concentraciones más elevadas en la localidad de Roca.

El análisis visual de los gráficos muestra que no existe una relación lineal simple. Las mayores densidades se registraron en Roca, un sitio próximo a zonas de cultivo, mientras que, en Ladera, a distancias similares, la densidad fue nula. En Parpacocha, ubicada a aproximadamente 1500 m, se presentaron densidades intermedias. El análisis estadístico mediante regresión lineal múltiple no mostró efectos significativos de la distancia a viviendas ni a campos sobre la densidad de *N. sphaericum* ($F(2,10) = 1.584$; $p = 0.253$; $R^2 = 0.241$).

De manera complementaria, las correlaciones locales evidenciaron una alta variabilidad espacial: en Parpacocha, la densidad se asoció positivamente con la distancia ($r = 0.713$), mientras que en Roca la relación fue inversa ($r = -1$). Estos resultados sugieren que la respuesta ecológica de *N. sphaericum* frente a la influencia antrópica depende de factores microambientales propios de cada sitio, más que de la distancia geográfica en sí.

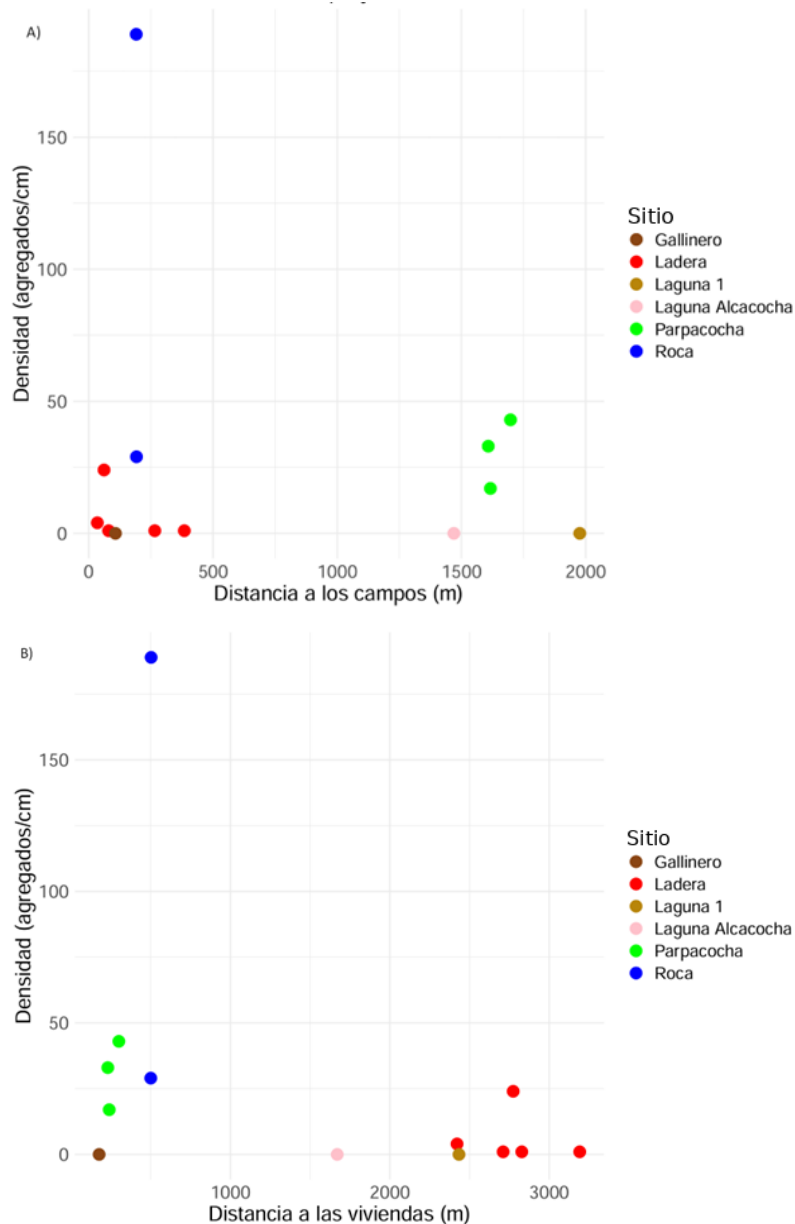


Figura 11. Relación entre la distancia a campos (A) y viviendas (B) con la densidad de *Nostoc* en distintos sitios.

La Figura 12 muestra la relación entre la distancia a las viviendas y el diámetro de *Nostoc sphaericum* en los tres hábitats evaluados. El análisis de varianza indicó diferencias marginalmente significativas entre hábitats (ANOVA: $F(2,7) = 4.375$; $p = 0.058$). Las comparaciones post hoc revelaron que los diámetros fueron significativamente mayores en Roca que en Parpacocha ($p = 0.049$), mientras que Ladera presentó valores

intermedios. En promedio, los diámetros alcanzaron 4.0 ± 0.0 mm en Roca, 3.0 ± 0.7 mm en Ladera y 2.3 ± 0.6 mm en Parpacocha.

El modelo lineal que evaluó la influencia de la distancia a viviendas y campos no mostró efectos significativos ($p = 0.170$). Esto sugiere que, si bien el tamaño de *Nostoc* no varía significativamente con la proximidad a las viviendas o cultivos, los hábitats rocosos más estables y de difícil acceso tienden a albergar colonias de mayor diámetro.

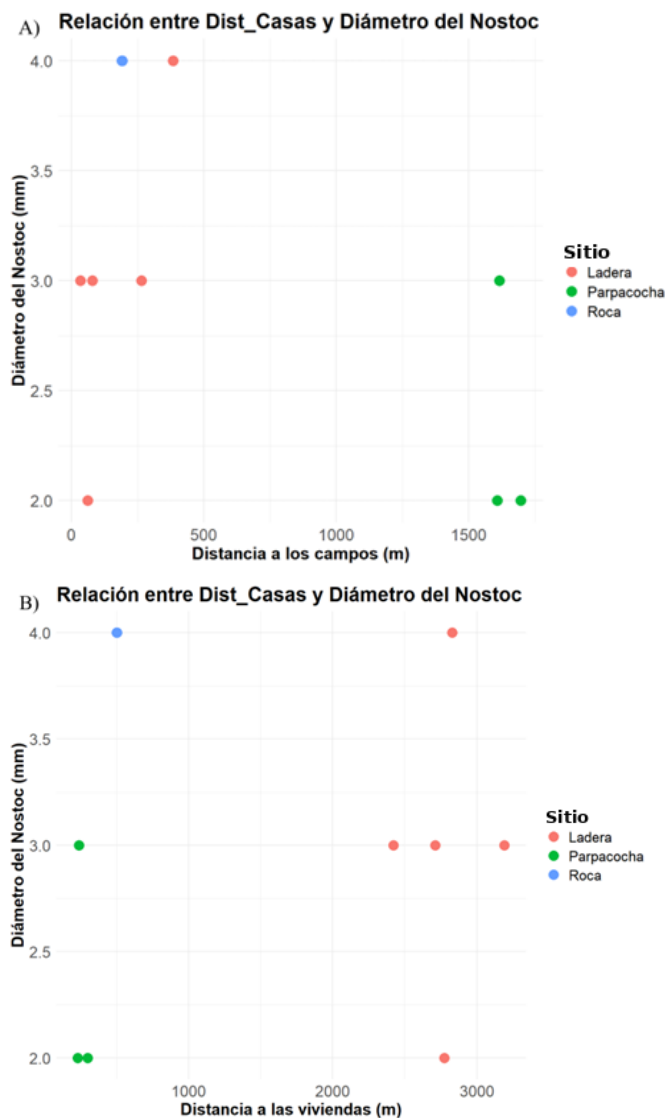


Figura 12. Relación entre la distancia a campos agrícolas (A) y viviendas rurales (B) con el diámetro de *Nostoc sphaericum* en los sitios de Ladera, Parpacocha y Roca.

VII. Discusión

El presente estudio tuvo como objetivo principal evaluar si la densidad poblacional de *Nostoc sphaericum* en San Pedro de Cajas varía en función de su proximidad a zonas agrícolas y áreas pobladas, considerando además las condiciones fisicoquímicas del agua. Esta investigación adquiere relevancia al tratarse de una cianobacteria de alto valor ecológico, nutricional y cultural, cuya presencia ha disminuido visiblemente en las últimas décadas (38). A pesar de su importancia, la literatura científica sobre *N. sphaericum* es aún limitada, especialmente en lo que respecta a sus patrones ecológicos en ecosistemas altoandinos y su sensibilidad frente a presiones antropogénicas. En este contexto, los resultados obtenidos contribuyen a cerrar una brecha de conocimiento clave para el diseño de estrategias de conservación y monitoreo en ambientes vulnerables de alta montaña.

7.1 Variables ambientales

En los cuerpos de agua donde no se registró presencia de *Nostoc sphaericum*, las variables fisicoquímicas mostraron asociaciones moderadas entre sí (Figura 2A), lo que sugiere un sistema con mayor interdependencia entre parámetros ambientales. En cambio, en los sitios donde la cianobacteria estuvo presente, dichas relaciones se debilitaron (Figura 2B). Este patrón es consistente con la idea de que *N. sphaericum* tiende a establecerse en microhábitats donde las condiciones fisicoquímicas son más heterogéneas o menos acopladas entre sí, probablemente influenciadas por la dinámica local del flujo, el microrelieve y la estructura del hábitat (bofedal o pozas rocosas).

Se ha descrito que un aumento del pH puede favorecer la solubilización de minerales y, con ello, incrementar la fracción disuelta del sistema (40). Sin embargo, en este estudio *N. sphaericum* se asoció a valores de TDS marcadamente más bajos, mientras que su ausencia coincidió con concentraciones más elevadas (Figura 3C). En términos ecológicos, valores de TDS por debajo de 1 000 ppm son característicos de ambientes dulces saludables; no obstante, incrementos sostenidos de la fracción disuelta pueden afectar la fisiología de organismos sensibles y modificar la composición de la comunidad acuática (40, 41). Aunque el patrón presencia–bajo TDS fue consistente, los análisis de regresión lineal múltiple no evidenciaron asociaciones estadísticamente significativas

entre variables ambientales (conductividad, alcalinidad, TDS) y la densidad de la cianobacteria ($p > 0.10$ en todos los casos). Esto sugiere que el TDS describe mejor el “filtro” de ocurrencia (presencia/ausencia) que la magnitud local de la población (cuánta biomasa o acumulación de agregados se observa), por lo que la interpretación debe centrarse en el contexto del microhábitat.

Asimismo, las diferencias observadas en pH, conductividad y TDS sugieren una relación ecológica estrecha entre estas variables y la cianobacteria. Si bien este estudio muestra asociaciones y no permite establecer causalidad, la literatura indica que *Nostoc* también puede modificar su entorno inmediato. Durante la fotosíntesis, por ejemplo, la reducción del CO_2 disuelto puede elevar el pH del microambiente (42). En ambientes con baja capacidad amortiguadora, como pequeñas depresiones rocosas con bajo volumen de agua, esta retroalimentación local podría contribuir a parte de la variabilidad observada en pH y, de manera indirecta, en la fracción disuelta del sistema.

En cuanto al pH, *Nostoc* se registró tanto en ambientes rocosos con pH alcalino (> 7) como en los sitios de Ladera y Parpacocha, donde el pH se mantuvo alrededor de 6. Este patrón podría explicarse, en parte, por la capacidad amortiguadora del suelo y la materia orgánica en bofedales (43). La presencia activa de *Nostoc* en ambientes ligeramente ácidos no es contradictoria, ya que la cianobacteria puede mantener un pH intracelular relativamente estable (7.1–7.5) aun cuando el pH externo varía (44), mediante mecanismos de autorregulación como los antiportadores Na^+/H^+ (45). Investigaciones en *Nostoc commune* han demostrado esta plasticidad fisiológica (46), y la capacidad de *N. sphaericum* para formar envolturas mucilaginosas (7) sugiere mecanismos funcionales comparables. En conjunto, estos antecedentes respaldan que la relación entre pH y desempeño de *Nostoc* depende de condiciones específicas del microhábitat, más que de un único rango ambiental.

La dureza y la alcalinidad no mostraron una correlación significativa con la presencia de *Nostoc*. Sus valores (dureza > 160 mg/L y alcalinidad 30–100 mg/L) clasifican el hábitat como “agua dura”, con capacidad de amortiguación moderada (47, 48). Si bien estos parámetros no parecen actuar como factores limitantes directos en este estudio, confirman el contexto geoquímico de bofedales altoandinos, donde la interacción agua–

roca es constante (49). En ese marco, las diferencias entre Roca, Parpacocha y Ladera pueden entenderse como el resultado de la combinación entre litología y régimen hídrico.

Los patrones por hábitat sugieren además que la relación entre TDS y presencia/densidad no es uniforme. En la Figura 6 se observa que, en Ladera, la presencia de *Nostoc* coincidió con una disminución de TDS, mientras que en sitios rocosos se registraron incrementos. Este contraste puede explicarse por procesos locales: en microhábitats rocosos, la meteorización puede liberar minerales al medio, proceso potencialmente facilitado por actividad microbiana asociada (50, 51); en Parpacocha, en cambio, el flujo constante desde el lago podría favorecer una acumulación relativamente estable de sales disueltas (Anexo 3). Por ello, los TDS observados deben interpretarse como el resultado de balances locales entre aporte, retención y dinámica hídrica.

Finalmente, aunque se observó vegetación en los bofedales de Parpacocha y Ladera, la presencia de *Nostoc* no fue uniforme, lo que sugiere que la vegetación (que también puede influir en la fracción disuelta mediante absorción o retención de solutos) no sería el principal determinante (52). Esto refuerza la hipótesis de que la calidad (composición) de los TDS, y no solo su concentración total, podría estar relacionada con la presencia de la cianobacteria. Estudios previos han demostrado que algunas cianobacterias pueden aprovechar carbono orgánico e inorgánico disuelto (53,54), por lo que la composición específica de los TDS (por ejemplo, la presencia de compuestos orgánicos favorables) podría facilitar el establecimiento y mantenimiento de *Nostoc* en determinados puntos.

7.2 Tamaño y abundancia de *Nostoc*

En cuanto al diámetro de los agregados de *Nostoc sphaericum* (Figura 7), los resultados sugieren una tendencia a tamaños mayores en los microhábitats rocosos, aunque la variabilidad entre puntos fue alta. Este patrón es coherente con la idea de que las cavidades y superficies rocosas húmedas pueden ofrecer condiciones relativamente más estables para el desarrollo de agregados, además de un suministro continuo de minerales por disolución del sustrato (51, 55). En Parpacocha, en cambio, los agregados tendieron a ser más pequeños, lo que podría relacionarse con mayor competencia por

recursos en bofedales más productivos o con diferencias en la disponibilidad local de nutrientes (55). En conjunto, estos hallazgos respaldan que el tipo de sustrato puede influir en el crecimiento, pero también sugieren que intervienen otros factores microambientales no medidos que modulan el diámetro observado.

La relación exploratoria entre TDS y diámetro (Figura 8) no mostró un patrón uniforme entre hábitats. En algunos puntos se aprecia una tendencia a diámetros mayores con TDS más altos, pero este comportamiento no se mantuvo de manera consistente, especialmente en Parpacocha, donde pese a registrarse TDS elevados los agregados fueron pequeños. Esto sugiere que la mineralización del agua por sí sola no determina el tamaño de los agregados, y que el diámetro probablemente responde a la interacción entre condiciones locales del microhábitat y presiones bióticas. En este sentido, una mayor exposición a depredadores como protozoos (56) y bacterias líticas (57), así como la recolección por personas o aves (10), podrían limitar el crecimiento continuo, fragmentar agregados o reducir el diámetro promedio observado.

Respecto a la abundancia, el análisis de densidad (Figura 10) indica que las mayores concentraciones de *N. sphaericum* se registran en microhábitats rocosos, particularmente en cavidades y bordes húmedos. Estas estructuras pueden funcionar como refugios al retener humedad, amortiguar perturbaciones físicas y favorecer la acumulación local del organismo; además, suelen presentar buena exposición solar y, en ciertos puntos, menor intervención directa. Por ello, la abundancia observada se interpreta mejor como una respuesta a condiciones microambientales específicas (estructura del sustrato y estabilidad hídrica) que como un efecto uniforme de la cercanía a viviendas o campos agrícolas.

La estacionalidad refuerza esta interpretación. Durante la temporada seca no se observó *Nostoc* activo (Anexo 4), lo que indica que la disponibilidad de agua constituye un factor crítico para su expresión visible y su crecimiento. Las entrevistas con pobladores reportaron una disminución notable desde la década de 1980, cuando era común encontrarlo en lagunas cercanas como Chaquicocha (Gallinero), ubicada relativamente próxima a viviendas y campos agrícolas. Esta cercanía sugiere exposición a presiones antrópicas que, sumadas al uso intensivo del suelo, podrían haber contribuido a su

desaparición local. La expansión agrícola (58) y la tendencia regional hacia menor precipitación (59) son consistentes con esta hipótesis, al implicar tanto mayor presión sobre el territorio como menor recarga hídrica.

Durante la temporada seca, *Nostoc* entra en latencia como respuesta a la desecación, baja humedad y limitación de iones (18; 24). Las concentraciones registradas de nitratos (< 10 ppm) y fosfatos (< 1 ppm) no indican contaminación, sino condiciones oligotróficas típicas, coherentes con la capacidad de fijación de nitrógeno que le confiere una ventaja competitiva en ambientes pobres en nutrientes. Este estado de latencia depende no solo de la rehidratación, sino también de la temperatura y de la disponibilidad de nutrientes. La producción de exopolisacáridos contribuye a la protección frente a la desecación (60), y el aumento de biomasa puede demorar entre 12 y 15 días en condiciones favorables (61), lo que explicaría su aparición días después de lluvias intensas. Este retraso podría representar una adaptación para sincronizar su crecimiento con periodos de lluvia más sostenidos (62).

Nostoc sphaericum cumple funciones ecológicas esenciales como base de redes tróficas, biofertilizante natural (24) y estabilizador del sustrato. Su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico contribuye a la fertilidad del suelo y, al ser fotosintético, participa en la captura de carbono. Su matriz mucilaginoso alberga comunidades bacterianas específicas, actuando como refugio microbiano (63). Es probable que *N. sphaericum*, dada su morfología y hábitats (7), cumpla funciones ecológicas comparables.

El papel del carbono inorgánico disuelto (CO_2 y HCO_3^-) es clave para su fisiología. En altitudes elevadas como San Pedro de Cajas (4030 m s.n.m.), la baja presión parcial de CO_2 limita su difusión hacia el agua. Por ello, estas cianobacterias han desarrollado mecanismos de concentración de carbono (CCM) que capturan activamente HCO_3^- y lo convierten en CO_2 mediante anhidrasa carbónica, optimizando la fotosíntesis en ambientes con bajo carbono inorgánico (31). Estos mecanismos están regulados finamente según las condiciones ambientales y el pH (64, 65). Desde esta perspectiva, los patrones de mayor tamaño y abundancia en ciertos microhábitats pueden interpretarse como el resultado de una interacción entre estabilidad hídrica, química local y disponibilidad de carbono utilizable, más que como el efecto aislado de variables

como dureza o pH. La calidad del hábitat, por tanto, no depende exclusivamente de un parámetro, sino de su interacción con procesos que determinan la disponibilidad de carbono utilizable. La alteración del ciclo del carbono por procesos agrícolas podría afectar indirectamente la disponibilidad de HCO_3^- , comprometiendo la fotosíntesis y, por ende, la abundancia de las poblaciones.

En algunos casos, *Nostoc* forma asociaciones simbióticas con hongos o musgos, generando líquenes (66), lo que amplía su función ecológica y ofrece protección estructural (67). Por ello, una disminución sostenida de *N. sphaericum* podría impactar negativamente la flora, fauna y el equilibrio ecológico de bofedales y cuerpos de agua de altura.

7.3 Distancia a factores antropogénicos

El análisis jerárquico (dendrogramas, Figura 11) mostró agrupamientos diferenciados. Sitios como Parpacocha y Roca (con mayor densidad) compartieron patrones espaciales que podrían reflejar condiciones favorables. En cambio, sitios como Laguna 1, Laguna Alcacocha y Gallinero (sin presencia de *Nostoc*) formaron clústeres definidos por su densidad nula y ubicación, más que por condiciones ecológicas favorables. Esto evidencia la necesidad de incorporar más variables de sustrato para una interpretación precisa. Los sitios de Ladera mostraron mayor variabilidad, posiblemente por su heterogeneidad espacial, lo que sugiere condiciones transicionales.

En conjunto, los resultados muestran que la densidad y morfología de *N. sphaericum* varían según temporada, hábitat e influencia humana. Alteraciones como el arado para cultivo de maca podrían reducir su distribución. Testimonios locales indican desaparición de poblaciones tras el arado. Aunque no se hallaron efectos estadísticos claros de la distancia a los cultivos (Figura 12), la calidad del agua (TDS) y las intervenciones humanas locales (arado, expansión agrícola) emergen como factores que podrían estar restringiendo las poblaciones, actualmente limitadas a microhábitats menos perturbados.

VIII. Conclusiones

El presente estudio evidenció que la distribución espacial de *Nostoc sphaericum* en el distrito de San Pedro de Cajas responde a una interacción de factores ambientales, estacionales y antrópicos. En concordancia con el objetivo general, se evaluó si la densidad poblacional variaba en función de la distancia a campos agrícolas y a viviendas rurales/centros poblados; los resultados sugieren que dicha distancia no explica por sí sola los patrones de presencia y abundancia, y que su influencia sería principalmente indirecta, a través de cambios locales en el microhábitat y en la calidad del agua.

A escala local, *N. sphaericum* se registró principalmente en microhábitats de refugio poco perturbados, como cavidades rocosas húmedas y bofedales. Su ocurrencia se asoció de manera consistente con aguas de baja mineralización (bajos TDS), mientras que el pH se mantuvo en rangos cercanos a la neutralidad o ligeramente ácidos según el tipo de hábitat. En contraste, la ausencia en sitios históricamente productivos, pero actualmente intervenidos sugiere que la perturbación local (p. ej., modificación del paisaje, arado y uso intensivo del suelo) puede limitar su establecimiento y persistencia, aun cuando estos sitios se encuentren a distancias similares de cultivos o viviendas.

La estacionalidad fue un factor determinante: no se observó *N. sphaericum* en estado activo durante la temporada seca, lo que confirma que la disponibilidad de agua es un factor crítico. Incluso en época de lluvias, su distribución fue heterogénea y dependió de factores como el tipo de sustrato y la calidad del agua (TDS). Aunque la dureza y la alcalinidad no mostraron correlación directa con su densidad, reflejan el contexto geoquímico de sus hábitats. Asimismo, la disponibilidad de carbono inorgánico en altura podría influir en su metabolismo y abundancia.

En cuanto a su morfología, los agregados de mayor tamaño se registraron en ambientes rocosos. Aunque las diferencias entre sitios no fueron estadísticamente significativas, la tendencia sugiere que la estructura del hábitat influye en su crecimiento. Este patrón fue respaldado por el análisis jerárquico; no obstante, la ausencia de *Nostoc* en algunos sitios agrupados (Figura 11) confirma que la proximidad geográfica no siempre refleja condiciones ecológicas favorables.

Adicionalmente, testimonios locales recogidos en San Pedro de Cajas señalan una disminución visible de esta cianobacteria, coincidiendo con la expansión agrícola. Aunque estas percepciones no fueron analizadas formalmente, son coherentes con los patrones ecológicos observados, sugiriendo una contracción de su hábitat original, restringiéndolo a microambientes más estables y menos intervenidos.

En conjunto, los resultados reafirman que *Nostoc sphaericum* cumple con los criterios para ser considerada una especie bioindicadora en ecosistemas acuáticos altoandinos, al presentar:

- Alta sensibilidad a variaciones fisicoquímicas del agua (especialmente TDS).
- Dependencia de microhábitats oligotróficos.
- Respuesta medible a fluctuaciones hidrológicas (ciclo seco/lluvia).
- Función ecológica clave en el ciclo de nutrientes.

Su permanencia depende del equilibrio hidrológico, geoquímico y climático. Por ello, es fundamental implementar estrategias de monitoreo y conservación, especialmente en zonas donde la presión agrícola se intensifica, poniendo en riesgo este recurso ecológico, alimenticio y cultural.

IX. Referencias bibliográficas

1. Ramírez E, Islas A. Identificación de algas y cianobacterias. Jóvenes Investigadores. 2014;1(1):193-198.
2. Dail H, David E, et al. Biology and Management of *Nostoc* (Cyanobacteria) in Nurseries and Greenhouses. SS-AGR-431-Span, University of Florida. 2019.
3. Rubio R. Evaluación de la producción de *Nostoc* sp (Cushuro) en cochas construidas a diferentes profundidades dentro de un ecosistema de humedal, en el sector Carpa, distrito de Cátac - Ancash. Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo", Facultad de Ciencias del Ambiente, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. 2018.
4. Cadena M, Molina D, et al. Bioprospecting study of *Nostoc* sp. macrocolonies in the Ecuadorian Andes. Acta Bot. Venez. 2013;36(2):287-307.

5. Terraza I, Rodrigues C. Evaluación de la cinética de secado y valor biológico de cushuro (*Nostoc sphaericum*). Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial. 2010.
6. Chávez P. Composición química y actividad antioxidante in vitro del extracto acuoso de *Nostoc sphaericum* (Chusuro), Laguna Cushurococha - Junín. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Medicina, E.A.P. de Nutrición. 2014.
7. Becerra-Absalón I, Tavera R. Life cycle of *Nostoc sphaericum* (*Nostocales*, *Cyanoprokaryota*) in tropical wetlands. *Nova Hedwigia*. 2009;88(1–2):117–128. doi:10.1127/0029-5035/2009/0088-0117
8. Torres A, Yupanqui C, et al. Comparison of the hydrocolloids *Nostoc commune* and *Nostoc sphaericum*: Drying, spectroscopy, rheology, and application in nectar. *Scientia Agropecuaria*. 2020;11(4):583-589.
9. Rivera M, Galetović A, Licuime R, Gómez-Silva B. A Microethnographic and Ethnobotanical Approach to Llayta Consumption Among Andes Feeding Practices. *Foods*. 2018;7(12):202. Published 2018 Dec 9. doi:10.3390/foods7120202
10. Ponce E. Nostoc: un alimento diferente y su presencia en la precordillera de Arica. *Idesia (Arica)*. 2014;32(2):119–121. doi:10.4067/S0718-34292014000200015
11. Leiva C, Sulluchuco P. Evaluación de la aceptabilidad del cushuro (*Nostoc sphaericum*) en preparaciones culinarias saladas y dulces, por estudiantes universitarios. Lima. Universidad Peruana Unión, Facultad de Ciencias de la Salud, Escuela Profesional de Nutrición Humana. 2018.
12. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. Inauguración del Centro de Investigación Científica y Tecnológica de Ecosistemas de Montaña “Reynaldo Trinidad Ardiles”. 2018.
13. Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú. Dominguez S. Andina: Más de 90,000 familias rurales se favorecerán con programa Sierra Azul. 2017.
14. Lopez E, Flores B. Efecto del consumo de hierro contenido en la murmuta (*Nostoc sphaericum*) en la recuperación de ratas con anemia inducida. Universidad

Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Ciencias Biológicas, Escuela Profesional de Ciencias de la Nutrición. 2017.

15. Jurado B, Fuertes C, et al. Estudio fisicoquímico, microbiológico, y toxicológico de los polisacáridos del *Nostoc commune* y *Nostoc sphaericum*. Rev. Per. Quím. Ing. Quím. 2014;17(1):15-22.
16. Méndez-Ancca, S.; Pepe-Victoriano, R.; Gonzales, H.H.S.; Zambrano-Cabanillas, A.W.; Marín-Machuca, O.; Rojas, J.C.Z.; Maquera, M.M.; Huanca, R.F.; Aguilera, J.G.; Zuffo, A.M.; et al. Physicochemical Evaluation of Cushuro (*Nostoc sphaericum* Vaucher ex Bornet & Flahault) in the Region of Moquegua for Food Purposes. Foods 2023, 12, 1939. <https://doi.org/10.3390/foods12101939>
17. N. Chasquibol, A. Sotelo, M. Tapia, R. Alarcon, F.M. Goycoolea, A.J. Hernández-Álvarez, Evaluation of cushuro (*Nostoc sphaericum*) as an alternative source of minerals, functional protein and bioactive peptides, LWT, Volume 217, 2025, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117426>.
18. Vipin Kumar Singh, Sandeep Kumar Singh, Prashant Kumar Singh, Hariom Verma, K.D. Pandey, P.K. Singh, Ajay Kumar, Chapter 10 - Impact of pesticides applications on the growth and function of cyanobacteria, Advances in Cyanobacterial Biology, Academic Press, 2020; Pag. 151-162. ISBN 9780128193112.
19. Gomez AC, Callata MA, Teodoro HC, Alarcón BE, Julca JP, Menacho LMP. Cushuro (*Nostoc sphaericum*): Hábitat, características fisicoquímicas, composición nutricional, formas de consumo y propiedades medicinales. Agroindustrial Science. 2021;11(2):231-238.
20. Tansay S, Issakul K, Ngearnpat N, Chunhachart O and Thuptimdang P (2021) Impact of Environmentally Relevant Concentrations of Glyphosate and 2,4-D Commercial Formulations on *Nostoc* sp. N1 and *Oryza sativa* L. Rice Seedlings. Front. Sustain. Food Syst. 5:661634. doi: 10.3389/fsufs.2021.661634
21. Cobo F. Métodos de control de las floraciones de cianobacterias en aguas continentales. Limnetica. 2015;34(1):247-268.
22. Diaz A, Sotomayor L. Evaluación de la eutrofización de la laguna conochoa-ancash a agosto de 2012. Escuela académico profesional de ingeniería ambiental,

- Facultad de ciencias del ambiente. Tesis para optar el título de ingeniero ambiental. 2013.
23. Plataforma del Estado Peruano. 25 de enero, 2021. S.f. Junín: SENASA detecta comercialización de plaguicidas prohibidos en tiendas agrícolas. Disponible en: <https://www.senasa.gob.pe/senasacontigo/junin-senasa-detecta-comercializacion-de-plaguicidas-prohibidos-en-tiendas-agricolas/>
 24. Singh JS, Kumar A, Rai AN, Singh DP. Cyanobacteria: A Precious Bio-resource in Agriculture, Ecosystem, and Environmental Sustainability. *Front Microbiol.* 2016;7:529. doi:10.3389/fmicb.2016.00529
 25. Solórzano-Acosta R, Chanco M, Seminario M, Cabello-Torres R, Camel V, Lastra S, Arias A, Verástegui P, Quispe K, Carbajal-Llosa C, Cuevas JP, Cruz J and Turín C (2025) Soil management in *Lepidium meyenii* (maca) monoculture: trends and challenges for small farmers around Lake Chinchaycocha in the Andean highlands of Junin (Peru). *Front. Soil Sci.* 4:1419745. doi: 10.3389/fsoil.2024.1419745
 26. Mayz J. Fijación biológica de nitrógeno. Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Laboratorio de Rizobiología. *Revista UDO Agrícola.* 2004;4(1):1-20.
 27. Programa Nacional de Innovación Agraria. Productores de maca de Junín mejoran su producción y rentabilidad. Gobierno del Perú. 2021. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/pnia/noticias/127698-productores-de-maca-de-junin-mejoran-su-produccion-y-rentabilidad>
 28. Heeren Diaz OM. Efecto directo e indirecto del exceso de hierro (Fe) disponible en el suelo sobre el desempeño del cultivo de *Lepidium meyenii Walp.* (Maca). Trabajo de investigación para optar por el grado de bachiller en ciencias con mención en Biología. Universidad Peruana Cayetano Heredia. 2021.
 29. Martínez A, Trujillo M, Ramírez E. Growth and metabolism of *Fischerella* TB22 in BG11 culture medium. *Bol. Micol.* 2020;35(1):26-34. DOI: 10.22370/bolmicol.2020.35.1.2425.
 30. Poschenrieder C, Fernández JA, Rubio L, Pérez L, Terés J, Barceló J. Transport and Use of Bicarbonate in Plants: Current Knowledge and Challenges Ahead. *Int J Mol Sci.* 2018;19(5):1352. Published 2018 May 3. doi:10.3390/ijms19051352

31. Kupriyanova, E.V.; Pronina, N.A.; Los, D.A. Adapting from Low to High: An Update to CO₂-Concentrating Mechanisms of Cyanobacteria and Microalgae. *Plants* 2023, 12, 1569. <https://doi.org/10.3390/plants12071569>
32. Ramírez L, Zepka L, Lopes E. Photobioreactor: Tool for mass cultivation of cyanobacteria. *UTEQ*. Quevedo -Ecuador. Article and review in science and technology. 2013;6(2):9-19.
33. Chuquilin R. Estudio de la biosorción de Cd (II) y Pb (II), usando como adsorbente el *Nostoc* (*Nostoc sp.*). Universidad Nacional del Centro del Perú. Tesis de posgrado de la Facultad de Ingeniería Química. 2015.
34. Revilla S, Pérez J, Salas J. Evaluación de la capacidad acumuladora de Cd (II), Pb (II), y Cr (VI) por colonias de *Nostoc commune* "Murmura". *Rev Soc Quím Perú*. 2018;84(2).
35. Arce, S., & Calderón, M. Suelos contaminados con plomo en la Ciudad de La Oroya- Junín y su impacto en las aguas del Río Mantaro. *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM vol 20 n° 40, 2017: 48 – 55. ISSN-L:1561-0888*
36. Otoya Fernández M. Potencial de *Distichia muscoides* en la biorremediación de un bofedal impactado con drenaje ácido de roca en Áncash. Para optar el título profesional de licenciada en Biología microbiología-Parasitología. 2023. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
37. Bibi F, Rahman A. An Overview of Climate Change Impacts on Agriculture and Their Mitigation Strategies. *Agriculture*. 2023;13:1508.
38. Kurahashi, M., & Naka, A. (2025). Edible Terrestrial Cyanobacteria for Food Security in the Context of Climate Change: A Comprehensive Review. *Applied Biosciences*, 4(2), 26. <https://doi.org/10.3390/applbiosci402002>
39. Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
40. Saalidong BM, Aram SA, Otu S, Lartey PO. Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground

- and surface water systems. PLoS One. 2022;17(1):e0262117. doi:10.1371/journal.pone.0262117
41. Scannell P, Jacobs L. Efectos of total dissolved solids on aquatic organisms. Technical Report No. 01-06. 2001. Alaska Department of fish and game. Division of habitat and restoration
 42. Mangan NM, Flamholz A, Hood RD, Milo R, Savage DF. pH determines the energetic efficiency of the cyanobacterial CO₂ concentrating mechanism. Proc Natl Acad Sci U S A. 2016;113(36):E5354–E5362. doi:10.1073/pnas.1525145113
 43. Jansen van Rensburg HG, Claassens AS, Beukes DJ. Relationships between soil buffer capacity and selected soil properties in a resource-poor farming area in the Mpumalanga Province of South Africa. S Afr J Plant Soil. 2009;26(4):237–243. doi:10.1080/02571862.2009.10639961
 44. Yadav P, Singh RP, Rana S, Joshi D, Kumar D, Bhardwaj N, et al. Mechanisms of Stress Tolerance in Cyanobacteria under Extreme Conditions. Stresses. 2022;2(4):531–549. doi:10.3390/stresses2040036
 45. Tsujii M, Kobayashi A, Kano A, Kera K, Takagi T, Nagata N, et al. Na⁺-driven pH regulation by Na⁺/H⁺ antiporters promotes photosynthetic efficiency in cyanobacteria. Plant Physiol. 2025;197(1):kiae562. doi:10.1093/plphys/kiae562
 46. Montoya TH, Fiestas IJA, Cruz SR, Quispe PR, Rodríguez VS. Comunidades criofílicas de los glaciares del nevado de Allincajac, Andes del sur de Perú, departamento de Puno: variabilidad fenotípica de la cianobacteria *Nostoc commune* (*Nostocales*, *Nostocaceae*). Arneldea. 2019;26(2):657–674. doi:10.22497/arnaldea.261.26209
 47. World Health Organization. Hardness in Drinking-Water: Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Geneva: WHO; 2011.
 48. Harris D. Análisis químico cuantitativo. 3ª ed. Barcelona: Editorial Reverté; 2007. p. 236.
 49. Squeo FA, Warner BG, Aravena R, Espinoza D. Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. Rev Chil Hist Nat. 2006;79(2):245–255. doi:10.4067/S0716-078X2006000200010

50. Ortiz-Castillo JE, Mirazimi M, Mohammadi M, Dy E, Liu W. The Role of Microorganisms in the Formation, Dissolution, and Transformation of Secondary Minerals in Mine Rock and Drainage: A Review. *Minerals*. 2021;11(12):1349. doi:10.3390/min11121349
51. Dong H, Huang L, Zhao L, Zeng Q, Liu X, Sheng Y, et al. A critical review of mineral-microbe interaction and co-evolution: mechanisms and applications. *Natl Sci Rev*. 2022;9(10):nwac128. doi:10.1093/nsr/nwac128
52. Raj A, Gupta A, Gupta N, Bhagyawant SS. Effect of Water TDS on the Growth of Plant (*Phaseolus vulgaris*). *Int J Plant Soil Sci*. 2023;35(12):131–136. doi:10.9734/ijpss/2023/v35i122977
53. Kang R, Wang J, Shi D, et al. Interactions between organic and inorganic carbon sources during mixotrophic cultivation of *Synechococcus* sp. *Biotechnol Lett*. 2004;26:1429–1432. doi:10.1023/B:BILE.0000045646.23832.a5
54. Zhao M, Qu D, Shen W, Li M. Effects of dissolved organic matter from different sources on *Microcystis aeruginosa* growth and physiological characteristics. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2019;176:125–131. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.03.085
55. Wagner A. Competition for nutrients increases invasion resistance during assembly of microbial communities. *Mol Ecol*. 2022;31(15):4188–4203. doi:10.1111/mec.16565
56. Dryden RC, Wright SJL. Predation of cyanobacteria by protozoa. *Can J Microbiol*. 1987;33(6):471–482. doi:10.1139/m87-080
57. Bauer A, Forchhammer K. Bacterial Predation on Cyanobacteria. *Microb Physiol*. 2021;31:99–108. doi:10.1159/000516427
58. Agro Rural. Gobierno entrega dos reservorios en San Pedro de Cajas a favor de 300 familias rurales de Junín [Internet]. Gobierno del Perú; 2025 Jan 27 [cited 2025 april 28]. Available from: <https://www.gob.pe/institucion/agrorural/noticias/1098018-gobierno-entregados-reservorios-en-san-pedro-de-cajas-a-favor-de-300-familias-rurales-de-junin>
59. Gobierno Regional Junín. Estrategia regional de cambio climático de Junín [Internet]. Junín: Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente; 2015 [cited 2025 april 28]. Available from:

<https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/127/2017/02/Estrategia-Regional-de-Cambio-Clim%C3%A1tico-de-Jun%C3%ADn.pdf>

60. Tamaru Y, Takani Y, Yoshida T, Sakamoto T. Crucial role of extracellular polysaccharides in desiccation and freezing tolerance in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune*. *Appl Environ Microbiol.* 2005;71(11):7327–7333. doi:10.1128/AEM.71.11.7327-7333.2005
61. Mougá T, Pereira J, Moreira V, Afonso C. Unveiling the Cultivation of *Nostoc* sp. under Controlled Laboratory Conditions. *Biology (Basel).* 2024;13(5):306. doi:10.3390/biology13050306
62. Rajeev, L., da Rocha, U., Klitgord, N. *et al.* Dynamic cyanobacterial response to hydration and dehydration in a desert biological soil crust. *ISME J* 7, 2178–2191 (2013). <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.83>
63. Aguilar P, Dorador C, Vila I, Sommaruga R. Bacterial Communities Associated With Spherical *Nostoc* Macrocolonies. *Front Microbiol.* 2019;10:483. doi:10.3389/fmicb.2019.00483
64. Scannell P, Jacobs L. Efectos of total dissolved solids on aquatic organisms. Technical Report No. 01-06. 2001. Alaska Department of fish and game. Division of habitat and restoration.
65. Burnap RL, Hagemann M, Kaplan A. Regulation of CO₂ Concentrating Mechanism in Cyanobacteria. *Life (Basel).* 2015;5(1):348-371. Published 2015 Jan 28. doi:10.3390/life5010348
66. Reháková K, Johansen JR, Casamatta DA, Xuesong L, Vincent J. Morphological and molecular characterization of selected desert soil cyanobacteria: three species new to science including *Mojavia pulchra* gen. et sp. nov. *Phycologia.* 2007;46:481–502.
67. Nash, T. H. III (Ed.). (2008). *Lichen Biology* (2nd ed.). Cambridge University Press.

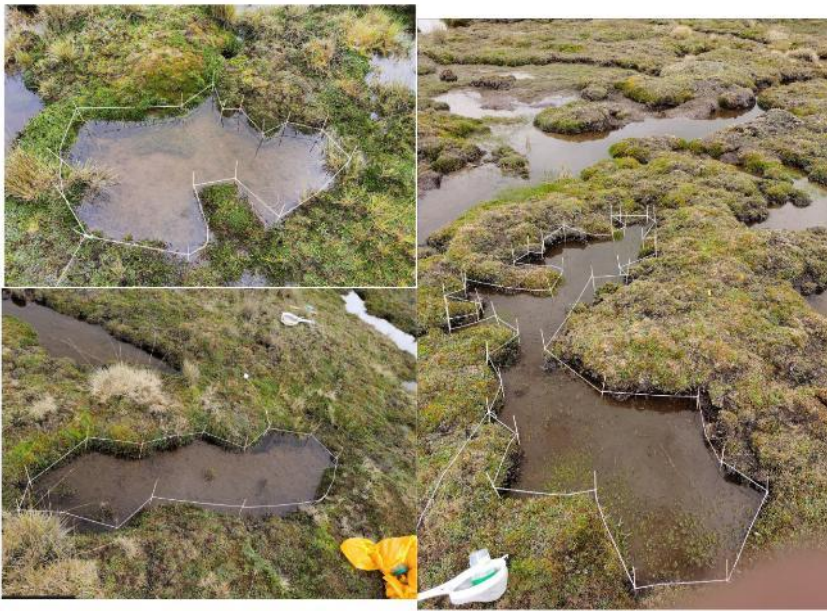
Anexos



Anexo 1: Lugares de recolección de la ladera, parte superior temporada de lluvia e inferior temporada seca



Anexo 2: *Nostoc* encontrando en el cerro, nombre de sitio: Roca



Anexo 3: Lugares de recolección de Parpacocha, parte superior temporada de lluvia y inferior temporada seca



Anexo 4: Laguna por la ladera, parte de izquierda en temporada de lluvia y derecha en temporada seca





Anexo 5: Lagunas donde no se encontraron laguna 1 (A), laguna Alcacocha (B) y Gallinero (C)