



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
“Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy”



POSGRADO INICIT



MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

**Relación de las diatomeas y la hidrogeoquímica
para determinar la calidad del agua termal de
Puruándiro, Michoacán**

TESIS

QUE PRESENTA:

Oscar Alejandro Jiménez Champo

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera

CODIRECTORA DE TESIS

Dra. Isabel Israde Alcántara

Morelia, Michoacán, junio 2026

Oscar Alejandro Jiménez Champo

Relación de las diatomeas y la hidrogeoquímica.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old::3117:581508986

Fecha de entrega

21 abr 2026, 4:38 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

21 abr 2026, 4:50 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Relación de las diatomeas y la hidrogeoquímica.pdf

Tamaño del archivo

9,1 MB

110 páginas

31.905 palabras

183.198 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 99%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Texto oculto

69 caracteres sospechosos en N.º de páginas

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio	
Título del trabajo	Relación de las diatomeas y la hidrogeoquímica para determinar la calidad del agua termal de Puruándiro, Michoacán	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Ing. Oscar Alejandro Jiménez Champo	1832198k@umich.mx
Director	Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera	alejandro.avila@umich.mx
Codirectora	Dra. Isabel Israde Alcántara	isabel.israde@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Boris Chako Tchamabe	mae.geociencias.planificacion.territorio@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Si	Fue necesario traducir ciertos textos escritos originalmente en Aleman.
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Si	Fue necesaria para mejorar la sintaxis y signos de puntuación en algunos textos.
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Si	Fue necesaria para buscar bibliografía específicos sobre el tema.
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán 20/04/2026

Agradecimientos

Este trabajo es el resultado de un camino de aprendizaje, esfuerzo y crecimiento que no habría sido posible sin el acompañamiento de personas fundamentales en mi vida.

A mi asesora, la Dra. Isabel Israde Alcántara, por su guía constante, su confianza y respaldo. Su apoyo no solo fortaleció esta investigación, sino que también impulsó mi desarrollo profesional, permitiendo alcanzar uno de los sueños más importantes de mi formación. Así como, a quienes formaron parte de mi comité evaluador, por su acompañamiento y aportaciones durante este proceso, en especial a la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada, que apoyó significativamente a este trabajo durante las salidas de campo y laboratorio. Y a la Mtra. Dulce María Bocanegra Ramírez por su apoyo, asistencia y amistad en el laboratorio del INICIT

A la Dra. Nelida Abarca y a sus colegas por recibirme en el Jardín Botánico de Berlín, Alemania y el apoyo brindado durante mi estancia académica, el cuál enriqueció significativamente este trabajo.

A mi familia – mis padres, mi hermano, mi abuelita y mi tío por su apoyo constante, la motivación y el impulso que me permitió seguir adelante.

Y a las amistades que hice y me acompañaron durante este proceso de maestría, gracias por todas las risas y los momentos compartidos que hicieron de esta etapa, algo inolvidable.

Índice

Agradecimientos.....	VII
Índice	VIII
Resumen.....	X
Abstract.....	XI
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Marco teórico	2
1.1.1. Agua dulce.....	2
1.1.2. Algas.....	2
1.1.3. Diatomeas	3
1.1.4. Manifestaciones termales	6
1.1.5. Ambientes extremos	7
1.2. Antecedentes.....	9
1.3. Problemática	12
1.4. Justificación	13
1.5. Hipótesis.....	13
1.6. Objetivos:	13
1.6.1. General:.....	13
1.6.2. Específicos:.....	13
1.7. Localización del área de estudio	14
1.7.1. Geología regional.....	15
1.7.2. Unidades litológicas aflorantes	16
1.7.3. Geología local	17
1.7.4. Clima	17
Capítulo 2. Metodología.....	19
2.1 Procedimiento metodológico para el análisis de diatomeas.....	20
2.1.1 Muestreo y preservación de las muestras.....	21
2.1.2 Procesado y análisis de diatomeas	21
2.1.3 Análisis ecológico y estadístico	26
2.2 Procedimiento metodológico para el análisis hidrogeoquímico	31
2.2.1 Caracterización hidrogeoquímica de los manantiales	32

2.2.2	Análisis y representación hidrogeoquímica.....	35
Capítulo 3. Resultados		38
3.1	Hidrogeoquímica	38
3.2	Clasificación térmica	38
3.3	Caracterización fisicoquímica.....	39
3.4	Aniones y cationes mayoritarios	41
3.5	Elementos traza	45
3.6	Hidrogeoquímica	48
3.6.1	Diagramas de Piper	48
3.6.2	Diagramas de Stiff	50
3.7	Análisis multivariados	53
3.8	Diatomeas.....	57
3.9	Clasificación ecológica de las especies	57
3.10	Listado taxonómico.....	63
3.11	Diversidad de la comunidad	75
3.12	Análisis multivariados	76
3.12.1	Clúster.....	76
3.12.2	NMDS	77
3.12.3	Mapas de calor.....	79
3.13	Relación ambiente – especie.....	81
3.13.1	Análisis de Correspondencia Canónica	83
Capítulo 4. Discusión		86
4.1	Fisicoquímica de los manantiales	86
4.2	Caracterización hidrogeoquímica y definición de facies	86
4.3	Elementos traza como indicadores de procesos naturales y antrópicos	88
4.3.1	Elementos tóxicos y su relación con afecciones a la salud.	89
4.4	Comunidad diatomológica	90
4.5	Relación diatomeas-variables ambientales.....	94
Capítulo 5. Conclusiones.....		96
Bibliografía		98
Anexos		106

Resumen

Las diatomeas son usadas como indicadoras de calidad de agua, generalmente en sistemas lóticos y lénticos en México debido a esto, el estudio de la clase *Bacillariophyceae* en manantiales con presencia hidrotermal son escasos en el país. Conocer la distribución y abundancia de las diatomeas en las manifestaciones termales de la Cabecera Municipal de Puruándiro permitió establecer relaciones con los parámetros fisicoquímicos, así como también con las facies hidrogeoquímicas de la zona. Para este trabajo se muestrearon 16 manantiales termales, un río y un manantial en las temporadas de estiaje y lluvias. Las muestras presentan un amplio rango de temperaturas que oscilan entre 20.1° y 75.1 °C en época de estiaje, y de entre 14.7° y 69.1 °C en época de lluvias, con el aumento de la conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD). Las facies hidrogeoquímicas mostraron una dominancia de tipo Na-Cl en las manifestaciones termales asociadas a las especies dominantes *Achnanthes exigua* y *Denticula thermaloides*, junto con la presencia de las especies subdominantes *Anomoeoneis sphaerophora*, *Craticula accomoda*, *Rhopalodia gibberula*, *Rhopalodia acuminata* y *Tryblionella granulata*. Se observó un alto grado de contaminación en los sitios correspondientes a los sectores norte, centro y oeste de la zona. Durante el estiaje, el manantial Carano presentó elevadas concentraciones de nitratos asociadas a la presencia de *Achnanthidium minutissimum*. En los sectores centro y oeste, durante las lluvias, se detectaron concentraciones altas de arsénico relacionadas con *Rhopalodia gibberula*, *Tryblionella granulata* y *Craticula accomoda*, así como alta concentración de nitratos en el sector centro. En relación con lo anterior, se observó una tolerancia, adaptabilidad y relación de las especies a las variables ambientales del sistema termal sin verse afectado por la temporalidad.

Palabras clave: *Bacillariophyceae*, termalismo, ecología, fisicoquímica, facies hidrogeoquímicas

Abstract

Diatoms are commonly used as indicators of water quality, generally in lotic and lentic systems in Mexico; therefore, studies on the class Bacillariophyceae in hydrothermal springs are still scarce in the country. Understanding the distribution and abundance of diatoms in the hydrothermal manifestations of the municipal head of Puruandiro allowed the establishment of relationships with physicochemical parameters, as well as with the hydrogeochemical facies of the area. For this study, 16 thermal springs, one river, and one freshwater spring were sampled during the dry and rainy seasons. The samples presented a wide temperature range, varying from 20.1 to 75.1 °C during the dry season and from 14.7 to 69.1 °C during the rainy season, together with increasing electrical conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS). The hydrogeochemical facies showed a dominance of the Na-Cl type in the thermal manifestations associated with the dominant species *Achnanthes exigua* and *Denticula thermaloides*, along with the presence of the subdominant species *Anomoeoneis sphaerophora*, *Craticula accomoda*, *Rhopalodia gibberula*, *Rhopalodia acuminata* y *Tryblionella granulata*. A high degree of contamination was observed at sites corresponding to the northern, central and western sectors of the area. During the dry season, the Carano spring presented high nitrate concentrations associated with the presence of *Achnanthidium minutissimum*. In the central and western sectors during the rainy season, high arsenic concentrations were detected in relation to *Rhopalodia gibberula*, *Tryblionella granulata*, and *Craticula accomoda*, as well as high nitrate concentrations in the central sector. In relation to the above, the species showed tolerance, adaptability, and association with the environmental variables of the thermal system without being significantly affected by seasonality.

Capítulo 1. Introducción

En los cuerpos de agua existe una gran variedad de macro y microorganismos que interactúan con el ambiente, destacando la presencia de las diatomeas, que son microorganismos unicelulares fotosintéticos, diferenciadas del resto del fitoplancton por paredes celulares formadas de sílice (SiO_2), similares a una caja de Petri con perforaciones y diversos ornamentos que encierran al protoplasto eucariota (Bargu et al., 2011). Este tipo de microalgas se pueden encontrar en distintos sistemas acuáticos como lo son los sitios litorales y profundos, con formas de vida planctónica y bentónica (Round et al., 1990).

Debido a su gran tolerancia, preferencia y exigencia respecto de las condiciones fisicoquímicas del medio, las diatomeas son excelentes marcadoras para la evaluación de la calidad del agua. Por ello es esencial una adecuada recolección de las muestras, sean vivas o bien, depositadas en los sedimentos, macrofitas o rocas, así como su adecuada preservación. Se requiere el posterior uso de técnicas de limpieza necesarias para remover la materia orgánica y sales que permitan la correcta observación microscópica de las valvas para una identificación taxonómica precisa (Stoermer & Smol, 1999).

Aunque su ecología ha sido estudiada en ambientes lóticos y lénticos, los manantiales termales representan un tipo de ambiente menos investigado. El origen de las aguas termales se puede clasificar en: (1) magmático, aguas que se forman mediante la liberación de elementos volátiles durante la cristalización de los magmas en su ascenso; (2) volcánico, ocurre en el transcurso de la consolidación de las lavas y el vapor de agua; (3) químico, agua proveniente de las reacciones químicas en el interior de la corteza terrestre; y (4) meteórico, surge por la infiltración de agua meteórica al subsuelo. Estas aguas ascienden mediante espacios porosos de las rocas o sistemas de fallas y fracturas hacia la superficie formando manantiales cuya composición puede variar debido a procesos de mezcla (Camargo et al., 2022a). Y, por ende, también variará la composición de los conjuntos de diatomeas.

Las fuentes termales y sus zonas de descarga proporcionan hábitats acuáticos abundantes para algas termófilas, aumentando el crecimiento de estos organismos sustancialmente por la gran riqueza mineral que poseen sus aguas (Castenholz, 1969). Sin embargo, como ya se mencionó, son escasas las investigaciones que han abordado la abundancia de especies y su relación con las condiciones fisicoquímicas que influyen en ellas, particularmente en el caso de las diatomeas presentes en ambientes con hidrotermalismo en México.

Los estudios de geotermia en México se han enfocado en la generación de electricidad y en los usos directos del agua caliente, existiendo actualmente múltiples zonas de aprovechamiento geotérmico y centros termales utilizados con fines recreativos y terapéuticos a lo largo de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (Pantoja Alor & Gómez Caballero, 2004).

Una aportación de este trabajo es constituir un estudio de referencia sobre las condiciones fisicoquímicas de los manantiales termales y su relación con las diatomeas. Además de caracterizar el hábitat de las diatomeas en ambientes termales, se define el impacto antrópico sobre las algas en el sector de Puruándiro, Michoacán.

1.1. Marco teórico

1.1.1. Agua dulce

Dentro de la hidrósfera terrestre, el agua dulce representa una proporción muy reducida, cerca del 3 % del volumen total disponible (Bezaury et al., 2017). Estos ecosistemas, sean permanentes o intermitentes resaltan por su gran diversidad debido a diferentes condiciones climáticas y geológicas (Habit et al., 2019).

Los microorganismos desempeñan un papel fundamental en los sistemas acuáticos. Algunos grupos, como las diatomeas y otras microalgas actúan como productores primarios, al ser organismos fotosintéticos capaces de generar materia orgánica; otros microorganismos, son responsables de la descomposición de la materia orgánica y de los ciclos biogeoquímicos. En conjunto estos organismos contribuyen a servicios ecosistémicos como la regulación, soporte y provisión (Habit et al., 2019).

Los microorganismos se encuentran ampliamente distribuidos en el agua, sedimentos y, especialmente, en tapetes microbianos fotosintéticos. Aunado a esto, por factores como las características del terreno y concentraciones de gases disueltos, proporcionan al agua dulce una amplia variedad de sustancias químicas naturales que favorecen la preferencia, adaptación y tolerancia de especies a condiciones ambientales específicas. Un ejemplo de ello es el valor de la conductividad eléctrica del agua dulce, que depende del contenido de sales disueltas y otros minerales que oscila entre 0 y 1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Habit et al., 2019).

1.1.2. Algas

Las algas de agua dulce están presentes en lagos, lagunas, ríos y arroyos, donde la salinidad es mínima y exhiben una gran diversidad de especies con variaciones en tamaños y formas. Estas algas presentan entre 8 y 12 linajes evolutivos (*Tabla 1*) que poseen representantes en aguas continentales. Según las clasificaciones actuales, la mayor parte de las algas son consideradas protistas con presencia de cloroplastos o procariotas fotosintéticas. Pese a que las algas no forman parte de un grupo taxonómico formal, comprenden una colección diversa de filos o divisiones en varios reinos. Dichos organismos se diferencian entre sí por una serie de características que incluyen pigmentos fotosintéticos, productos de reserva, cubiertas celulares, entre otros aspectos de organización celular (Wehr et al., 2015).

Tabla 1. Clasificación de los 12 linajes evolutivos (Wehr et al., 2015).

• Cianobacterias.	• Algas haptofitas.
• Algas rojas.	• Algas sinurófitas.
• Algas verdes.	• Diatomeas.
• Euglenoides.	• Dinoflagelados.
• Algas eutigmatofitas, radiofitas y xantofitas.	• Algas criptófitas.
• Algas crisófitas.	• Algas marrones.

1.1.3. Diatomeas

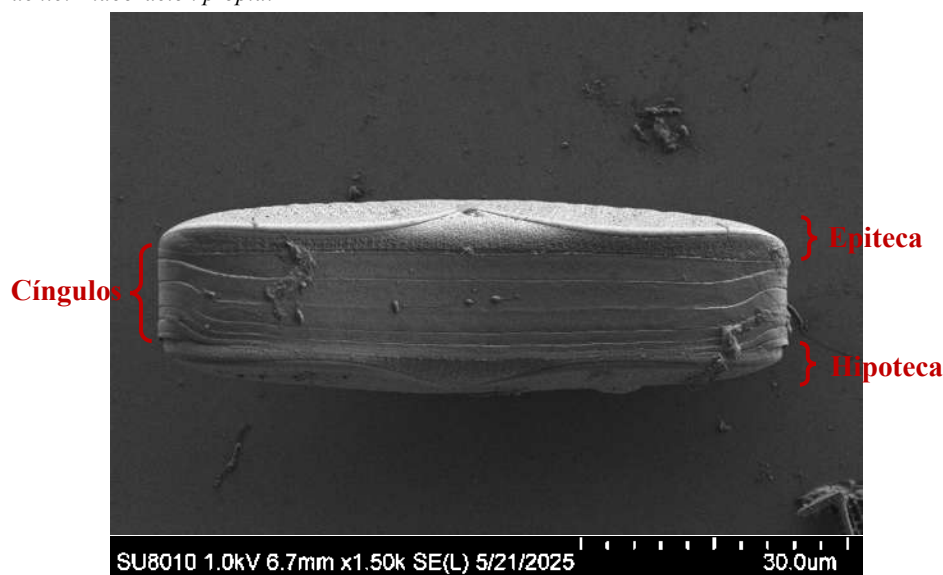
Las diatomeas son microalgas eucariotas unicelulares o coloniales; sus paredes celulares están compuestas por caparazones silíceos (Stoermer & Smol, 1999). Su nombre proviene del griego 'dia' = A través y 'temnein' = cortar, haciendo alusión a sus células divididas en dos partes, similares a una caja de Petri (Bargu et al., 2011).

Se sugiere que la existencia de las diatomeas data de alrededor de ~ 210 a 144 Ma, apareciendo en el Jurásico temprano. En el ambiente marino y durante el Mioceno, se observa una gran invasión de las diatomeas en ambientes continentales a diversas temperaturas, y variaciones en el pH, así como en aguas salobres. La mayoría de los taxa están basados en una morfología frústular, variando considerablemente en forma y estructura entre especies (Stoermer & Smol, 1999).

1.1.3.1. Estructura

Las diatomeas presentan un exoesqueleto de partículas de tamaño nanométrico de sílice (SiO_2) resultado de la metabolización del ácido silícico del medio ambiente y la formación de frústulos. Un frústulo completo está compuesto por dos valvas relativamente grandes, asociadas a una serie de bandas conocidas como *cíngulos* (Fig. 1). La proporción conocida como *epiteca* comprende la valva superior, considerada la más antigua, además del cíngulo asociado a ella, e *hipoteca* a la valva inferior más reciente y el cíngulo que conforma el margen de dicha estructura.

Figura 1. Vista lateral de una *Epihemia* observada por microscopía electrónica de barrido (SEM). Se distinguen la *epiteca* y la *hipoteca*, así como las bandas cingulares que conforman el frústulo.
Fuente: Elaboración propia.

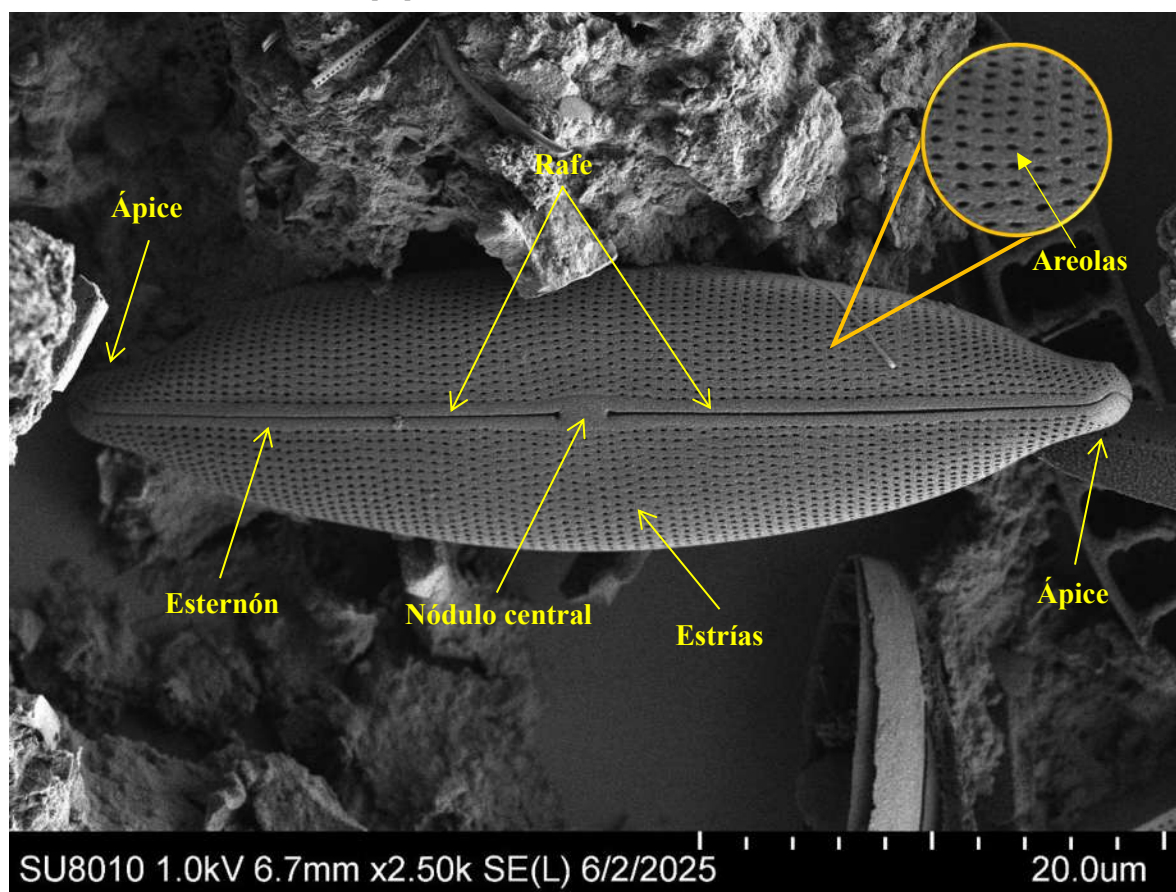


La pared silícea de estos microorganismos es semiconservativa; esto quiere decir que, una vez dividida en dos, cada célula hija hereda una pared parental y da comienzo la síntesis de una nueva valva previo al proceso de separación de la célula hija. En vesículas delimitadas por membranas dentro del protoplasto, ocurre la deposición de la sílice amorfo hidratado para la formación de nuevas valvas y elementos del cíngulo que son liberados por la fusión entre la silicalema y la plasmalema (Round et al., 1990).

Las valvas están constituidas por estructuras silíceas en forma de costillas o *estrias* que se disponen y expanden desde una zona central, de forma circular o alargada, desde una barra principal denominada *esternón*, a medida que la valva se genera. Entre estos relieves suelen ubicarse áreas más finas, conformadas por láminas delgadas o por placas porosas de sílice. En numerosas diatomeas ráfidas, los poros se encuentran cubiertos por una fina membrana de sílice conocida como *himen*, la cual presenta perforaciones de forma circular o alargada llamadas *aréolas* (Fig. 2).

El esternón es acompañado por una o dos hendiduras referidas como *rafe*, extendiéndose a lo largo de casi toda la valva. Ambas hendiduras se encuentran interrumpidas por un puente de sílice denominado *nódulo central* y las terminaciones brindan información sobre las relaciones entre los taxa.

Figura 2. Imagen de microscopio electrónico de barrido de una diatomea pennada con rafe. Se observa el rafe longitudinal, el esternón que lo acompaña, nódulo central que irrumpe la continuidad del rafe y las estrias formadas por filas de areolas. Fuente: Elaboración propia.



La ubicación, longitud y morfología del rafe, junto con otros ornamentos valvares constituyen caracteres de gran relevancia taxonómica (Round et al., 1990).

1.1.3.2. Clasificación

Mediante el uso de la microscopía electrónica de barrido se ajustan los esquemas taxonómicos con la finalidad de reflejar las agrupaciones monofiléticas, con frecuencia, las especies son reasignadas dentro y/o fuera de nuevas categorías (Stoermer & Smol, 1999).

Una clasificación propuesta por Schütt (1896) divide a las diatomeas en dos grupos principales en función de la morfología de sus valvas. Por un lado, establece a las diatomeas *céntricas* (Fig. 3), cuyas valvas presentan formas circulares o geometrías poligonales. Por otro lado, distingue a las diatomeas *penadas* (Fig. 4), caracterizadas por poseer valvas alargadas con simetría bipolar.

Figura 3. Imagen SEM de *Discostella stelligera* (Cleve and Grunow) Houk and Klee: 1. Área central con presencia de alvéolos largos, a menudo en forma de estrella, 2. Costillas marginales radiales, 3. Fultoportulas marginales. Fuente: Lowe, n.d.

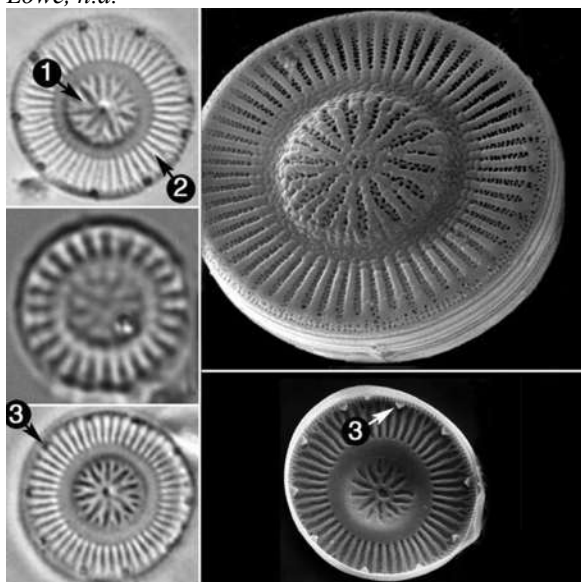
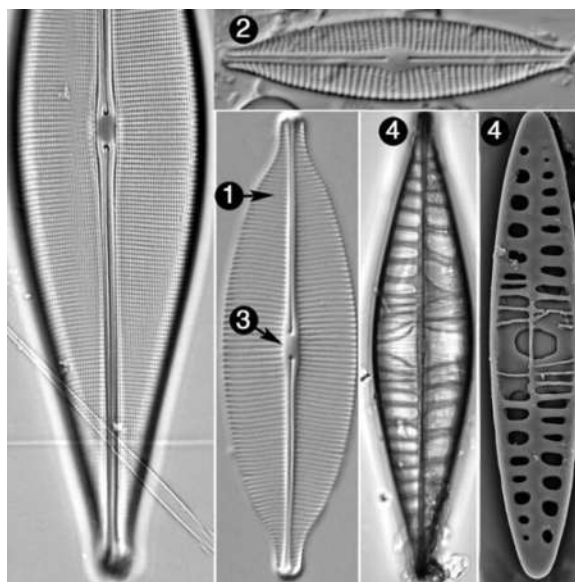


Figura 4. Imagen SEM de *Craticula perrotetii* Grunow: 1. Estriás paralelas, 2. Valva lanceolada, 3. Área central pequeña, 4. Estructura interna diferenciada. Fuente: Fuelling et al., n.d.



Desde una perspectiva taxonómica más fina, las diatomeas penadas pueden organizarse en dos grupos principales: las pennadas que poseen rafe (*rafideas*) y las pennadas que carecen de esta estructura (*arafideas*). Esta distinción, aunque no forma parte de la clasificación original de Schütt, se utiliza para una mejor comprensión de la variación morfológica dentro de las formas pennadas (Round et al., 1990).

1.1.3.3. Forma de vida

Las diatomeas se caracterizan por ser esencialmente unicelulares, aunque en algunos taxa se observan configuraciones coloniales, estas pueden conformarse mediante la unión de espinas, almohadillas, tallos de mucilago o hilos de polisacáridos.

a) Enlace por estructuras silíceas

Una vez formadas las células hermanas dentro del frústulo principal, existe la posibilidad de que se produzcan enlaces con pocas posibilidades de deshacerse; estos enlaces son unidos por espinas u otras estructuras silíceas.

b) Enlace por almohadillas o tallos de mucilago

Este tipo de enlaces se debe a la adhesión por un material polisacárido que puede unir una parte de la valva o toda la valva. Dependiendo de la posición de la almohadilla, las colonias presentarán distintas formas o pueden encontrarse adheridas al sustrato.

c) *Colonias unidas por hilos de polisacáridos*

Las diatomeas se mantienen unidas en cadenas unidas por hilos o filamentos de polisacáridos compuestos por quitina, ocurriendo en algunos géneros céntricos (Round et al., 1990).

1.1.4. Manifestaciones termales

La Tierra no solo provee energía calórica contenida en los materiales fósiles, sino que también genera energía de manera activa, misma que es liberada a través de erupciones volcánicas, fumarolas, movimientos sísmicos y, en particular, el calor originado en las zonas profundas del planeta (Pesce & Miranda, 2003). Dicho calor, puede ser transferido por dos mecanismos:

- ✓ Conducción: el calor es transferido a través de las rocas sin necesidad de un movimiento de materia, siguiendo un gradiente de temperaturas desde zonas más calientes a zonas más frías. Dependiendo principalmente de la conductividad térmica del material geológico.
- ✓ Convección: el calor es transferido a través del movimiento de fluidos, como agua o vapor, que circula por diferencias de gradientes de temperatura. Cuando el fluido es calentado, disminuye su densidad y asciende, mientras que el fluido más frío es denso y desciende, formando corrientes convectivas (Toth & Bobok, 2016).

Las manifestaciones hidrotermales superficiales asociadas a un sistema geotérmico ubicado en una región volcánica constituyen elementos iniciales que impulsan actividades de exploración. Estas manifestaciones surgen por la filtración de fluidos calientes mediante fallas y fisuras o unidades de roca permeable, que se manifiestan en la superficie terrestre. En función de las temperaturas del yacimiento y las tasas de descarga, se observan diversas manifestaciones termales, tales como filtraciones, fumarolas, manantiales termales, géiseres, cráteres de explosión freática, zonas de alteración ácida, así como depósitos de sinterización de sílice, travertino y/o brechas (Wohletz & Grant, 1992).

Hoy en día, los fluidos termales son aprovechados en la producción de energía eléctrica en plantas geotérmicas, y los usos directos del calor, que comprenden: balneología, calefacción y refrigeración, agricultura, acuicultura, procesos industriales, etc. (Pesce & Miranda, 2003).

1.1.4.1. Manantiales termales

De acuerdo con los autores Glazier (2009), Kresic y Stevanovic (2010), un manantial termal puede describirse como el lugar donde emerge naturalmente agua geotérmica hacia la superficie. Los factores geológicos, tectónicos, geotérmicos e hidrológicos controlan este tipo de manifestaciones. Sus variaciones son características de los sistemas geotérmicos de tipo cuenca, condicionados por pliegues, anticlinales y fallas, cámaras magmáticas y zonas de contacto (Zhou et al., 2023). Se considera un afloramiento hidrotermal aquel cuya descarga de agua registra una

temperatura al menos 5 °C superior a la temperatura media anual del sitio estudiado (Prol-Ledesma, 1999).

Una proporción significativa de las descargas hidrotermales naturales está constituida por aguas subterráneas calentadas por intrusiones magmáticas someras, características de los ambientes volcánicos. No obstante, existen áreas termales carentes de actividad volcánica. En tales casos, el calentamiento del agua se produce por circulación convectiva, al infiltrarse hasta zonas profundas donde el gradiente geotérmico eleva significativamente la temperatura de las rocas, así como a través de sistemas de fallas y fracturas (*Fig. 5*) (Pirajno, 2020).

Los manantiales muestran variaciones significativas en la temperatura y el pH. Según su rango térmico, se clasifican en *hipotermas* (21-35 °C), *mesotermas* (36-45 °C) e *hipertermas* (superiores a 45 °C). Por otro lado, de acuerdo con su pH, pueden ser identificados como *ácidos*, *alcalinos* o *neutros* (Camargo Cruz et al., 2022).

Las fuentes termales pueden representar zonas de descarga asociadas a los flujos regionales e intermedios de un sistema de aguas subterráneas, donde coexisten componentes de flujo local, intermedio y regional (Zhou et al., 2023). Estos fluidos están constituidos por aguas ácidas sulfatadas, alcalinas y ricas en bicarbonatos. Tienen mayor incidencia en laderas volcánicas y en lagos cráter. Las sinterizaciones de sílice son el producto más frecuente de los precipitados y aportan al crecimiento de los mantos microbianos (Pirajno, 2020).

Este sistema que brota en la superficie proporciona información valiosa sobre las condiciones de profundidad, los antecedentes geológicos regionales, la naturaleza, el tamaño y la actividad de las estructuras que controlan las fuentes de calor. Aunado a esto, desempeñan un papel importante en el desarrollo de la economía local y en la mejora de la calidad de vida de la población (Zhou et al., 2023).

1.1.5. Ambientes extremos

Se entiende por ambientes extremos los entornos que presentan condiciones climáticas, geológicas, químicas o biológicas inusualmente severas, las cuales, implican ciertos parámetros que están fuera de los niveles tolerables por la mayoría de los organismos. Entre estos factores sobresalen las temperaturas y salinidades que pueden ser muy elevadas o extremadamente bajas, un nivel de pH fuertemente alcalino o notablemente ácido, niveles de presión muy altos, así como una fuerte exposición a la radiación o una limitada presencia de agua y nutrientes (Ramírez Durán et al., 2021). A continuación, se detallan los principales parámetros que definen estos ambientes:

- *Temperatura*

La temperatura es un parámetro importante en la vida de los organismos. A temperaturas muy bajas, el agua dentro de las células tenderá a congelarse, dañando membranas celulares y estructuras internas, causando la muerte celular y el colapso del organismo. Por otro lado, si las temperaturas son elevadas, las proteínas y ácidos nucleicos se desnaturalizan y pierden su estructura tridimensional, así como su funcionalidad, afectando la actividad enzimática, la replicación del ADN, la síntesis de proteínas, entre otros procesos vitales. Por encima de los 75

°C, la clorofila se descompone deteniendo la fotosíntesis, impactando en la posibilidad de vida fotosintética en estos ambientes (Rothschild & Mancinelli, 2001).

Los organismos que evolucionaron para desarrollarse en ambientes con temperaturas extremas son asignados a tres categorías:

1. Hipertermófilos: presentan un óptimo desarrollo en temperaturas mayores a los 80 °C, observados en fuentes hidrotermales y fumarolas submarinas.
2. Termófilos: se desarrollan a temperaturas mayor o igual a los 45 °C.
3. Psicrófilos: registrados a temperaturas menores a los 15 °C, comúnmente vistos en el Ártico y la Antártida (Oliart Ros et al., 2016).

▪ *Presión*

A medida que se profundiza la presión hidrostática tiende a incrementarse. Un aumento en la presión puede inducir a la temperatura a condiciones óptimas para el desarrollo microbiano, solo en unos pocos grados, puesto que, puede comprimir el empaquetamiento de los lípidos dando lugar a una serie de múltiples repercusiones fisiológicas o patológicas.

Una variedad de organismos se ha adaptado a estas condiciones, también llamados piezófilos, soportan presiones en torno a 70 y 80 MPa, pero no debajo de 50 MPa (Rothschild & Mancinelli, 2001).

▪ *Salinidad*

Los organismos se desarrollan en un amplio rango de salinidad, desde el agua destilada hasta soluciones salinas saturadas. Estos presentan adaptaciones conocidas como osmofilia, e involucra los procesos osmóticos de la vida en ambientes con altas concentraciones de sal, incluyendo la presión de turgencia, la deshidratación celular y la desecación, y halofilia, está relacionada con los iones necesarios para la supervivencia en condiciones salinas elevadas (Rothschild & Mancinelli, 2001).

▪ *pH*

Los procesos biológicos normalmente se desarrollan en el rango medio del pH (Rothschild & Mancinelli, 2001). Sin embargo, los organismos que viven en los extremos de este rango se pueden denominar *acidófilos*, se adaptan favorablemente a un pH inferior a 5, y *alcalófilos*, logran un desempeño óptimo en pH superior a 8 (Oliart Ros et al., 2016).

En tiempos recientes, los colores observados en las aguas termales se deben a la presencia de microorganismos termófilos e hipertermófilos, indicando que estos ambientes constituyen un entorno favorable para la vida, ya que presentan tres factores esenciales: agua, una fuente de energía capaz de generar un equilibrio químico y disponibilidad de materiales orgánicos. Al contener estos factores y una fuente metabólica como lo es la fotosíntesis o la quimiosíntesis, estas fuentes termales se convierten en nichos ideales para el crecimiento y la reproducción de microorganismos (Pirajno, 2020).

1.2. Antecedentes

El estudio y análisis de diatomeas presenta múltiples aplicaciones, que abarcan desde su uso como bioindicadores de la calidad del agua hasta la reconstrucción de paleoambientes. Asimismo, estas microalgas se emplean en la detección de contaminación, evaluación de condiciones tróficas y monitoreo de cambios asociados al impacto humano. Esta aproximación ha facilitado el desarrollo de conocimiento sobre las características tróficas de cuerpos de agua significativos para las poblaciones que dependen de ellos para diversos usos.

El estudio de las diatomeas en manantiales termales ha recibido poca atención en México; no obstante, las investigaciones existentes ofrecen puntos de referencia importantes como lo es la realizada por López-Sandoval et al. (2016) sobre la diversidad algal en el manantial geotermal Los Hervideros, Michoacán. En su investigación se identificaron un total de 34 organismos, de los cuales un 63 % corresponden a la clase *Bacillariophyceae* (Diatomeas), 34 % a la clase *Cyanophyceae* y 3 % a la clase *Chlorophyceae*. Los resultados sugirieron que el umbral térmico superior de las diatomeas se encuentra cercano a los 47 °C. En particular, *Achnanthes exiguum* mostró un crecimiento óptimo a aproximadamente 40 °C, convirtiéndola en una especie representativa del sistema termal.

Adicionalmente, una investigación realizada por Puy-Alquiza et al. (2021) sobre diatomeas presentes en capas microbianas de las fuentes termales sulfurosas de Comanjilla, Guanajuato, en la que recolectaron muestras de cinco manantiales termales, de los cuales tres presentaban mantos microbianos marrones con temperaturas entre 64 y 92 °C, y con pH de 9.1, mientras que dos mostraban mantos verdes con temperaturas de 45 a 79 °C y pH de 7.6. *Achnanthes brevipes* var. *intermedia* y *Sellaphora disjuncta* fueron las especies dominantes. Se evidenció una disminución de la diversidad de especies a temperaturas cercanas a 90 °C, particularmente de *A. brevipes*, asociándose a las diferencias en pH, temperatura, turbidez y composición química de los manantiales.

En la caldera de Acoculco, Puebla, Israde-Alcántara et al. (2023) realizaron muestreos en temporadas de estiaje y lluvias para evaluar la influencia de las variables ambientales en las comunidades de diatomeas. Las manifestaciones hidrotermales exhibieron condiciones más ácidas y amplios rangos de conductividad eléctrica, la temperatura osciló entre 13.7 y 23.7 °C. Los índices de diversidad y riqueza evidenciaron diferencias claras entre los sitios, con mayor diversidad durante la época de estiaje. Los autores destacaron la dominancia de *Eunotia exigua* como especie tolerante a la acidez y asociada tanto a ambientes hidrotermales como a zonas con cierto grado de contaminación. Las variaciones en los nutrientes situaron al sistema entre condiciones pobres y moderadas, ocasionando que especies menos exigentes aparezcan como eutróficas y mesotróficas. En aguas fuertemente acidificadas (pH=1) influenciadas por procesos hidrotermales, predominaron géneros como *Eunotia*, *Pinnularia* y *Frustulia*. Por otro lado, en aguas alcalinas con (pH > 8) y ambientes planctónicos, fueron comunes *Stephanodiscus* y *Aulacoseiras*. No obstante, en arroyos donde la actividad hidrotermal no se mezcla con aguas alcalinas, se identificaron comunidades dominadas por *Cocconeis*, *Gomphonema*, *Navicula*, *Fragilaria* y *Achnanthes*.

Aunque la mayoría de las investigaciones se han centrado en manantiales termales continentales, se realizó un estudio sobre las manifestaciones hidrotermales marinas en la Ensenada Mapachitos, Baja California Sur. Estradas-Romero et al. (2009) analizaron los organismos de dos puntos de

muestreo: uno localizado directamente dentro de las manifestaciones hidrotermales y otro en una zona cercana sin influencia termal. En el interior del sistema hidrotermal, los valores de pH, tanto en superficie como en profundidad, variaron entre 6.6 y 8.4, mientras que en el sitio externo permanecieron estables (8.1-8.4). La temperatura fue la misma en ambos puntos (27.5 °C). Con base en las concentraciones de nutrientes, el área se clasificó como eutrófica con valores de nitratos (0.35 ± 0.22 mg), fosfatos (0.34 ± 0.28 mg) y amonio (1.5 ± 0.9 mg) que superan los valores típicamente asociados a este tipo de sistemas. Condición que favoreció la presencia de fitoplancton nocivo, caracterizado por una fuerte presencia de fitoflagelados y diatomeas, entre las cuales destacó *Chaetoceros curvisetus* como especie dominante.

Si bien la literatura latinoamericana sobre diatomeas en ambientes termales no es tan abundante como en otras regiones, se destaca un estudio realizado en el campo geotérmico de El Tatio, en el Altiplano chileno. Angel et al. (2018) evaluaron la respuesta de las comunidades de diatomeas a gradientes ambientales en distintos microhábitats acuáticos (fumarolas, ríos de agua dulce y salinos, y pantanos). La conductividad de los sistemas estudiados presentó gran variación, desde aproximadamente 360 hasta 18,340 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con temperaturas más bajas en ríos y pantanos, y más altas en fumarolas. Los pH oscilaron entre 3.25 en fumarolas y hasta 8.97 en aguas dulces; además, se observaron proporciones en el predominio de Ca^{2+} y Na^+ con Cl^- , y Mg^{2+} con SO_4^{2-} . Se distinguieron tres grupos principales de diatomeas. El primer grupo, relacionado con fumarolas salinas, baja conductividad y zonas termales con temperaturas de 30 a 35 °C, estuvo caracterizado por *Achnanthydium exiguum*, *Nitzschia perminuta* y *Staurosirella leptostauron*. Un segundo conjunto, asociado a zonas de descarga con conductividades intermedias, incluyó a *Achnanthydium minutissimum*, *Navicula cincta*, *N. tripunctata*, *Nitzschia amphibia*, *Caloneis bacillum*. Finalmente, en ambientes de agua dulce de ríos y pantanos, predominó un tercer grupo con *Nitzschia fonticola*, *Nitzschia palea*, *Cocconeis placentula*, *Planothydium lanceolatum* y *Planothydium frequentissimum*. Un análisis multivariante de tolerancias indicó que en conductividades con rango de 950 a 15,530 $\mu\text{S}/\text{cm}$, las especies *N. palea*, *Staurosira brevistriata*, *C. placentula* presentan un óptimo desarrollo; asimismo, factores como temperatura, fosfatos totales, nitratos y oxígeno disuelto influyen significativamente en la organización de las comunidades.

Otro enfoque relevante es el desarrollado por Céspedes-Vargas et al. (2016) referente a las asociaciones de diatomeas procedentes del Río Sarapiquí, Costa Rica, los autores midieron la tolerancia de 10 especies a factores fisicoquímicos. Los análisis estadísticos mostraron la preferencia de *Achnanthydium exiguum*, *Reimeria sinuata*, *Luticola ventriosa* y *Cymbella tumida* a aguas limpias, oxigenadas y de bajas temperaturas. Además, las especies *Nupela praecipua*, *Synedra gouldardi*, *Cocconeis placentula*, *Luticola goeppertiana*, *Nitzschia clausii* y *Navicula symmetrica* están asociadas a ambientes cálidos con poca oxigenación y mayor turbidez.

Existe una amplia producción académica en otras regiones del mundo que abordan el potencial de las diatomeas en aguas termales, lo que brinda la oportunidad de identificar patrones comunes, y diferencias regionales que contribuyen a una visión más completa del fenómeno.

En el extremo oriental de Rusia, en la Península de Kamchatka, se realizó un estudio sobre diatomeas en 14 manantiales termales. Estos cuerpos de agua presentaron temperaturas de 42.5 a 98 °C. Las comunidades de diatomeas estuvieron representadas por los géneros *Pinnularia*, *Eunotia* y *Nitzschia*, teniendo un mayor crecimiento a temperaturas que oscilan entre los 37 y 55 °C. En

cambio, se observó que en aguas ácidas a temperaturas mayores a 55 °C con aguas de tipo $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na-Ca}$, se presenta una disminución en la flora. En cuanto a *Pinnularia acidojaponica* y *P. acidophila*, los autores las reconocen como especies termófilas y características de las fuentes termales (Nikulina et al., 2019).

Un segundo estudio realizado en la Península de Kamchatka, Rusia, se centra en explorar la diversidad de diatomeas en suelos próximos a zonas de actividad termal. Los autores detectaron 49 taxa de diatomeas que comprendían tanto especies acuáticas como terrestres, con dominancia de *Pinnularia cf. subcapitata* y *Planothidium lanceolatum*. En cuanto a las afinidades ecológicas, 18 especies fueron clasificadas como bénticas, 31 especies como indiferentes a la salinidad y 24 especies presentaron preferencia por condiciones alcalinas. Diatomeas como *Diatoma moniliformis*, *Luticola acidoclinata*, *Navicula cincta*, *Sellaphora rectangularis* y *Staurosirella pinnata* fueron asociadas a condiciones halófilas. Adicionalmente, *Pinnularia borealis*, *P. subcapitata* y *P. microstauron* exhibieron una gran tolerancia ambiental, con valores de pH entre 3.2 y 9.4, así como temperaturas comprendidas entre 30 y 69.5 °C. Estas amplitudes evidenciaron una elevada resiliencia frente a condiciones extremas, por lo que fueron asociadas a ambientes ecotonaes (Fazlutdinova et al., 2020).

Nikulina & Kociolek (2011) realizaron un estudio sobre comunidades de diatomeas en diez manifestaciones termales ubicadas en las islas de Sajalín y Kuriles, Rusia. Los autores registraron una alta diversidad de taxones en un rango de temperaturas entre 37 y 60 °C, siendo los géneros *Pinnularia*, *Nitzschia* y *Navicula* los más frecuentes y diversos en el conjunto de las manifestaciones termales estudiadas. En las islas Kuriles, la composición florística mostró una baja influencia de la salinidad, con agrupaciones dominadas por especies oligosaprobias y β -mesosaprobias. En contraste, en la isla de Sajalín las comunidades estuvieron conformadas principalmente por especies acidófilas, también asociadas a condiciones β -mesosaprobias.

Lai et al. (2019) realizaron un estudio comparativo sobre la diversidad, ecología y distribución de diatomeas en 16 manantiales termales, evidenciando diferencias significativas entre los sitios analizados. En la región de Auvernia, Francia, se identificaron 61 especies, principalmente asociadas a temperaturas relativamente bajas (13.3 a 18 °C), con la dominancia de *Crenotia thermalis*. En esta región, altas concentraciones de nitratos se relacionaron con la presencia de *Sellaphora labernardierei*. Asimismo, en Cerdeña, oeste de Italia, se identificó una mayor riqueza de diatomeas (178 especies) asociada a manantiales más cálidos (49.3 a 53 °C), donde dominaron *Lemnicola exigua*, *Nitzschia amphibia*, *N. inconspicua* y *Rhopalodia operculata*. En este contexto, *Sellaphora nigri* se asoció con ambientes degradados y elevadas concentraciones de nitratos.

En el estudio realizado por Owen et al. (2008) los autores compararon comunidades de diatomeas en sistemas de aguas termales de Islandia, Nueva Zelanda y Kenia. Mediante análisis multivariados, los autores identificaron siete grupos de asociaciones florísticas. El primer grupo, integrado por *Frustulia rhomboides* y *Hantzschia amphioxys*, se asoció con manifestaciones termales de Nueva Zelanda e Islandia, caracterizadas por un pH moderado y altas concentraciones de sílice. El segundo y el séptimo grupo, procedentes exclusivamente de Nueva Zelanda, incluyeron una mayor abundancia del género *Pinnularia*, seguidos de especies como *Brachysira brebisson f. thermalis*, *Nitzschia inconspicua* y *Nitzschia obtusa* vinculadas a condiciones altamente ácidas y altas temperaturas. El tercer grupo corresponde a manifestaciones termales de Islandia; en cambio, el

cuarto, quinto y sexto grupo, forman parte de los sistemas geotermales de Kenia, todos ellos caracterizados por una mayor diversidad florística, temperaturas relativamente bajas y valores de pH moderados (7-8.5).

Un estudio realizado en manantiales de Galicia (noreste de España) analizó la composición de las comunidades de diatomeas en cinco manantiales: dos fríos (11 °C y 20 °C) y tres termales (37-44 °C). Los resultados evidenciaron una clara relación entre la distribución de las comunidades diatomológicas y las variables fisicoquímicas como la conductividad eléctrica, temperatura y los sulfuros. Las mayores abundancias se registraron en manantiales con temperaturas cercanas a los 45 °C, mientras que, en los manantiales fríos se observó una reducción en el número de individuos. Las especies más comunes fueron *Achnantheidium exiguum* y *Achnantheidium saprophilum*, destacando la presencia de *Achnantheidium minutissimum* en un manantial frío con altos contenidos de calcio y magnesio (Leira et al., 2017).

Siguiendo la misma línea de análisis de comunidades termales, en Tailandia, se estudiaron ocho manantiales donde se identificaron un total de 46 especies de diatomeas, siendo las más abundantes *Diatomella balfouriana*, *Achnantheidium axiguum* y *Anomoeoneis sphaerophora*. Los autores destacan la dificultad para definir una flora característica general de las fuentes termales, aunque cada manantial puede caracterizarse individualmente, observándose una disminución en el número de especies a medida que aumenta la temperatura (38-85 °C). La distribución de las diatomeas se vio influenciada por variables fisicoquímicas, como la concentración de sílice (23.9-143 mg L⁻¹), pH (6.8 a 8.8) y conductividad (381-1,135 µS/cm). Se observó que *Achnantheidium exiguum*, *Sellaphora lanceolata* y *Pinnularia abaujensis* predominaron en manantiales con elevada conductividad (Pumas et al., 2018).

1.3. Problemática

En México, las investigaciones sobre diatomeas en sistemas hidrotermales son aún limitadas. En particular, en la región de Puruándiro, Michoacán, la información disponible se ha centrado principalmente en aspectos hidroggeoquímicos - geológicos y el valor del patrimonio geotérmico mientras que, la comunidad de diatomeas y, la interacción entre las condiciones fisicoquímicas y la respuesta ecológica de la clase Bacillariophyceae en estos ambientes no ha sido abordada.

A demás, Puruándiro al ser una región con alto potencial geotérmico, sus manifestaciones termales han sido aprovechadas principalmente con fines de balneología y uso doméstico, así como actividades de aseo personal al aire libre, favoreciendo la presión antrópica que podría estar influyendo en la calidad de sus aguas.

1.4. Justificación

Aunque existen estudios previos asociados a la caracterización fisicoquímica de las aguas termales en la Cabecera Municipal de Puruándiro, Michoacán (Castillo-Ramírez, 2023), la caracterización detallada del medio natural requiere llevarse a cabo y la química del agua respecto a su relación con los componentes bióticos sigue siendo limitada. El análisis combinado de la química del agua y la taxonomía de las diatomeas permitirá complementar los estudios existentes y evaluar con mayor precisión el estado trófico de los cuerpos de agua.

Las diatomeas constituyen bioindicadores clave, reflejando sus preferencias, tolerancias y exigencias respecto a nutrientes, pH y metales pesados (Stoermer & Smol, 1999). Por su alta sensibilidad a los cambios ambientales, el estudio de estas comunidades permitirá identificar factores de riesgo en los manantiales del municipio y proporcionar recomendaciones a las autoridades, ejidatarios y población en general para su conservación.

Este estudio pretende ampliar el conocimiento sobre las comunidades de diatomeas en manantiales termales de México, mediante la elaboración de un inventario de especies y la evaluación de su estado ecológico.

1.5. Hipótesis

Se plantea que las comunidades de diatomeas en los manantiales termales de la cabecera municipal de Puruándiro reflejan las variaciones en las condiciones ambientales, tanto naturales como antropogénicas, capaces de afectar su crecimiento y morfología, permitiendo que estas actúen como herramientas confiables y de bajo costo para el monitoreo de la calidad del agua.

1.6. Objetivos:

1.6.1. General:

Analizar la distribución y abundancia de las diatomeas en relación con los parámetros químicos y fisicoquímicos del agua en los manantiales termales de la cabecera municipal de Puruándiro, Michoacán.

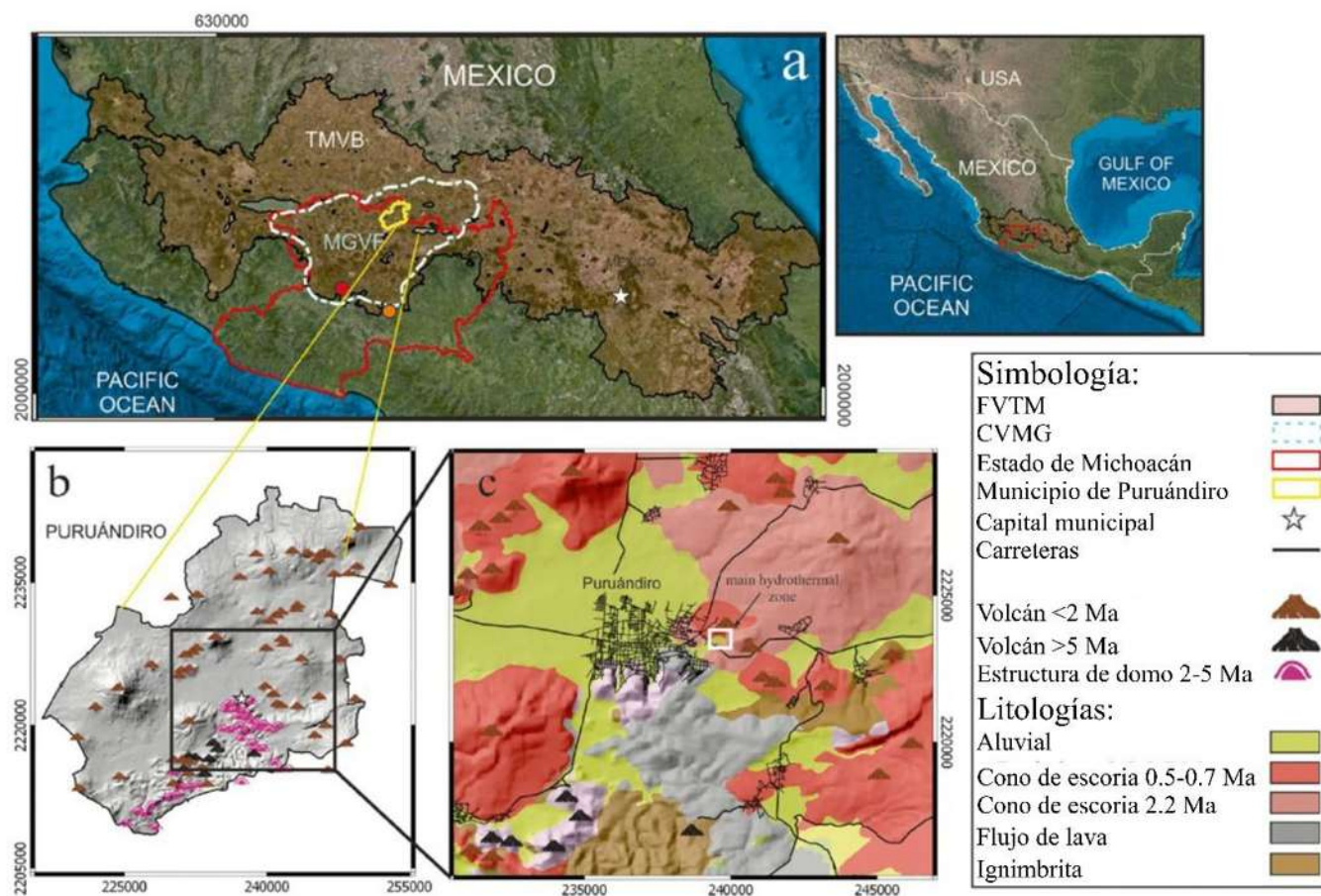
1.6.2. Específicos:

- ✓ *Elaborar un inventario taxonómico de las diatomeas presentes en los manantiales termales de Puruándiro.*
- ✓ *Determinar las tolerancias y preferencias de las diatomeas frente a un amplio rango de condiciones hidrogeoquímicas.*
- ✓ *Evaluar la influencia de los impactos antropogénicos en la composición y distribución de las comunidades de diatomeas en los manantiales termales.*

1.7. Localización del área de estudio

El municipio de Puruándiro se ubica en la porción norte del estado de Michoacán, México, dentro de la zona UTM 14N (Fig. 5), aproximadamente entre las coordenadas E 235 552.89 m y N 2 226 529.55 m. Limita al norte y al oeste con los municipios Angamacutiro y José Sixto Verduzco; hacia el sur colinda con Morelos, Panindícuaro y Jiménez; mientras que al este se encuentra el municipio de Yuriria, perteneciente al estado de Guanajuato.

Figura 5. Ubicación regional del municipio de Puruándiro. b) distribución espacial de las estructuras volcánicas; c) configuración geológica principal y localización de la zona de influencia hidrotermal. Modificado de Jácome-Paz et al. (2021).



Desde un punto de vista fisiográfico, la zona de estudio se sitúa dentro de dos subprovincias: la mayor parte del municipio corresponde a sierras y bajíos michoacanos y una pequeña porción pertenece al Bajío guanajuatense, lo que corresponde al 1.2% del área total del estado de Michoacán, integrado por 113 municipios. Se identifican las siguientes 4 topoformas (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2011):

1. Sierra volcánica de laderas tendidas con lomerío.
2. Volcanes tipo escudo y semiescudo.
3. Conos de escoria y flujos de lava.
4. Vaso lacustre.

1.7.1. Geología regional

Geológicamente, el municipio de Puruándiro se localiza en la porción central de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), formando parte de la cuenca sedimentaria denominada “El Bajío” y al Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (Jácome-Paz et al., 2021). La FVTM es un arco magmático continental de origen del Mioceno, generado por la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa Norteamericana. Esta zona se caracteriza por una intensa actividad volcánica y tectónica que ha dado lugar a la formación de aproximadamente 8,000 estructuras volcánicas, junto con numerosos cuerpos intrusivos, extendiéndose desde las costas de Pacífico hasta las del Golfo de México (Demant, 1978).

La actividad volcánica de la FVTM se desarrolló en tres etapas efusivas iniciando en el período Jurásico-Cretácico, la región estuvo caracterizada por un ambiente volcánico de mar marginal asociado a la subducción del paleo-Pacífico. Posteriormente, en el Oligo-Miocénico, se desarrolló un volcanismo de tipo margen continental activo relacionado con la subducción de la Placa Farallón. Finalmente, a partir del Mioceno medio, se establece la FVTM con asociaciones de basaltos y andesitas basálticas. Los esfuerzos tectónicos causados por la Placa Norteamericana causaron cierta influencia en el vulcanismo, pero no está relacionada con la génesis de los magmas, sino que se asocia a lo largo de las fracturas de tensión donde ascienden los magmas, desarrollando numerosos pequeños volcanes correspondientes a zonas como Michoacán-Guanajuato o la Sierra Chichinautzin. Por lo que el principal proceso vinculado con el vulcanismo de la FVTM fue el ocurrido en el Pacífico centro-oriental a finales del Cenozoico responsable del sistema de las placas Rivera y Cocos. Adicionalmente, se observa la presencia de basaltos a lo largo de esta cadena volcánica, los cuales son considerados como el magma primario y fraccionado con el tiempo (Demant, 1981).

La parte occidental de la FVTM, presenta vulcanismo de tipo calci-alcálido con orientación NW-SE resultados de la subducción de la Placa de Rivera, destacando la presencia de los volcanes San Juan, Sangangüey, Ceboruco y Tequila, constituidos por lavas andesíticas y dacíticas de plagioclasas, clinopiroxenos y ortopiroxenos con presencia de anfíboles. Los basaltos están dispuestos a lo largo de la fosa tectónica en forma de flujos de lava derivados de pequeños conos de escoria alineados por las fracturas regionales. En contraste, la parte central y oriental que representa el conjunto de procesos volcánicos de Michoacán, el valle de Toluca, México, Puebla, entre otros, con dirección W-E, debido al hundimiento de la Placa de Cocos, evidenciando la considerable actividad volcánica ocurrida en Michoacán a lo largo del Cuaternario (≈ 2.5 Ma) asociada a la porción occidental relativamente joven de la Placa de Cocos en el Plioceno tardío (~ 4.5 Ma) (Demant, 1981).

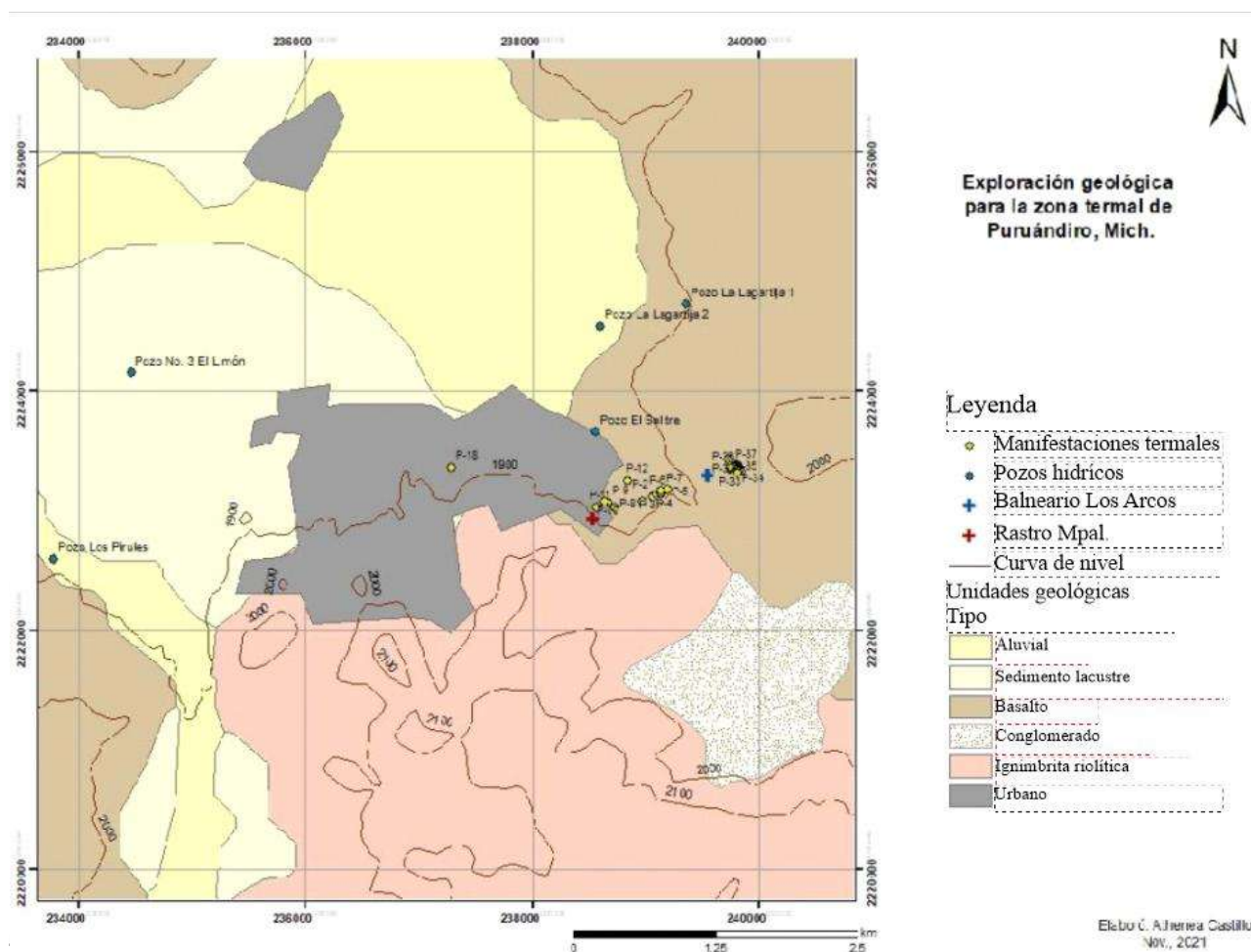
A nivel estructural, la FVTM se subdivide en tres sectores principales según la tipología de los volcanes y su relación con la tectónica regional. La porción occidental se encuentra limitada por los rifts de Colima, Tepic-Zacoalco y Chapala, así como por el extremo meridional de la Sierra Madre Occidental. La sección central incluye parte del Punto Triple Continental de Jalisco (PTJ) y el sistema de fallas Taxco-Querétaro, que controlan gran parte de la actividad tectónica y volcánica de la región. Finalmente, la porción oriental se extiende hacia la costa del Golfo de México, siguiendo la alineación de sistemas de fallas que conectan esta región con estructuras más distales (Gómez-Tuena et al., 2005).

En concordancia, el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), localizado en la porción central de la FVTM, está compuesto por un extenso sistema monogenético que incluye alrededor de 378 volcanes de tamaño medio y más de 1,000 estructuras volcánicas de menor dimensión en un área de 40,000 km² (Hasenaka, 1994), tales como conos de escoria y volcanes de tipo escudo pequeño, domos de lava y mares alineados E-W con respecto a las zonas de fallas con la misma orientación. Los lineamientos más abundantes presentan orientación N50-70E formando estructuras de tipo graben y horst, localizados en la parte noreste (Connor, 1987).

1.7.2. Unidades litológicas aflorantes

1.7.3. De acuerdo con Castillo-Ramírez (2023), quien recopiló datos geológicos de las instituciones SGM, GeoInfoMex y CONAGUA, la geología superficial de Puruándiro se encuentra dominada por tres tipos principales de depósitos (*Fig. 6*):

Figura 6. Distribución de los depósitos geológicos superficiales en Puruándiro. Modificado de Castillo-Ramírez (2023).



- **Ignimbrita riolitica:** Estas rocas se originaron a partir de nubes ardientes y presentan una elevada compactación con una matriz vítrea de tonalidad rojiza. Predominan las ignimbritas, que ocupan una proporción considerable del área. Su composición incluye cristales de cuarzo, feldespato y micas integrados en una matriz de vidrio volcánico. Tienen una edad aproximada de 23.7 millones de años, cercana al inicio del Mioceno, periodo durante el cual

también se produjeron procesos de erosión y deposición de sedimentos de grano fino a medio con baja permeabilidad.

- **Basaltos:** Posteriormente, hace aproximadamente 1.68 millones de años, cerca del Pleistoceno medio, se generaron emisiones basálticas. Durante este periodo se presentaron fases de intensa erosión que dieron lugar a depósitos fluviolacustres con predominio de facies clásticas, conformadas por arenas, gravas y arcillas, intercaladas con material piroclástico. Estos depósitos rellenan valles y forman conglomerados, así como tobas arenosas y limosas, distribuyéndose extensamente en lomeríos y conos volcánicos, con una permeabilidad considerada media.
- **Depósitos aluviales:** se localizan en las zonas topográficamente más bajas, cercanas a lomeríos y afloramientos basálticos. Estos depósitos recientes, con edades comprendidas entre 0.0042 millones de años y el presente (Holoceno, a partir de hace 0.0117 Ma), se originaron como resultado de los eventos geológicos más recientes y se acumulan principalmente relleno los valles (Castillo-Ramírez, 2023).

1.7.3. Geología local

Canul (1986) describió la geología local y estableció edades absolutas, basándose en un análisis petrográfico de las rocas y en la estratigrafía de los depósitos que conforman la zona, principalmente de origen volcánico. La estratigrafía del área permitió distinguir dos grandes tipos de cuerpos geológicos: rocas volcánicas y depósitos lacustres.

Las rocas volcánicas se presentan en tres episodios efusivos correspondientes al Mioceno, Plioceno y Pleistoceno. Las rocas más antiguas (desarrolladas en el Mioceno tardío) con aproximadamente 8 Ma, según la datación del material de los flujos de lava que las sobreyace, se concentran en el sector sur de Puruándiro y están dominadas por riolitas e ignimbritas ricas en cuarzo, líticos y fiammes. Por otro lado, las unidades más jóvenes (~ 4 Ma) formadas durante el Plioceno temprano al Cuaternario, se localizan al sur, sureste y este de la cabecera municipal de Puruándiro (*Fig. 5*), y comprenden:

- **Domos riolíticos:** constituidos por cuarzo, feldespato, biotita y fragmentos líticos en una matriz vítrea.
- **Domos de lava:** caracterizados por plagioclasas, minerales ferromagnesianos, xenolitos y cuarzo, acompañados de capas ignimbríticas que contienen vidrio, líticos, plagioclasa, cuarzo y fiammes.

En cuanto a los depósitos lacustres, estos son recientes y presentan espesores de alrededor de 20m, intercalados entre los domos e ignimbritas que alcanzan hasta 40 m, evidenciando la sedimentación en ambientes de aguas poco profundas.

En conjunto, estas rocas dieron lugar a edificios volcánicos cuyos productos se encuentran dispersos (Jácome-Paz et al., 2021).

1.7.4. Clima

El municipio de Puruándiro presenta una diversidad climática predominado por el subhúmedo con lluvias en verano, con una humedad media anual de 77.26%, así como el semicálido subhúmedo con

régimen de lluvias estivales, con valores de humedad que oscilan entre 7.94% y 14.80% (INEGI, 2010).

El análisis del comportamiento térmico se realizó a partir de información obtenida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), mediante el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para ello, se consideraron registros mensuales de temperatura máxima, mínima y media correspondientes al periodo 1950-2021 (*Tabla 2*), obtenidos de la estación meteorológica número 16104. La temperatura media mensual oscila entre 15.3 °C en enero y 22.6 °C en mayo, observándose en los meses de abril-mayo los valores más altos de temperatura, mientras que los meses de diciembre y enero exhiben las temperaturas más bajas. La temperatura máxima media registrada es de 27.2 °C y la temperatura mínima media es de 10.8°C.

Tabla 2. Promedios mensuales de temperatura máxima, media y mínima (°C) registrados en el municipio de Puruándiro, Michoacán, con base en datos de la estación meteorológica 16104 del SMN-CONAGUA (periodo 1950-2021).

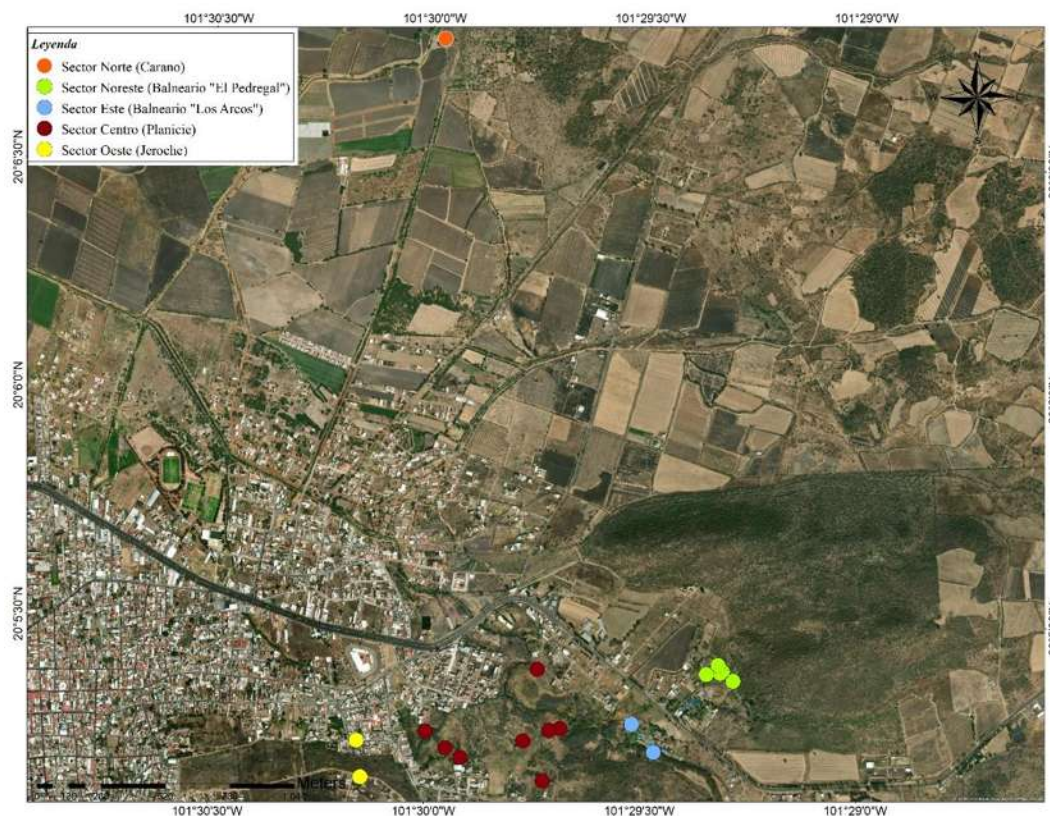
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>Temperatura maxima promedio (°C)</i>	24.2	26.1	28.8	31	31.5	29.3	26.8	26.6	26	26.1	25.8	24.4
<i>Temperatura media mensual (°C)</i>	15.3	16.8	19.2	21.4	22.6	21.7	20	20	19.6	18.7	17.2	15.8
<i>Temperatura mínima promedio (°C)</i>	6.4	7.5	9.6	11.9	13.6	14.2	13.2	13.4	13.2	11.4	8.6	7.1

Capítulo 2. Metodología

En este capítulo se describen los procedimientos metodológicos aplicados para la evaluación de la calidad del agua de los manantiales termales de Puruándiro, mediante el análisis de diatomeas y la caracterización hidrogeoquímica. El muestreo y el procesamiento de las muestras para el análisis de diatomeas fueron realizados por el autor, mientras que los análisis hidrogeoquímicos se realizaron en el laboratorio de la Unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, sede Morelia, a cargo de la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada.

El muestreo se realizó en un total de 18 sitios, durante dos periodos; estos incluyeron 16 manantiales termales, un manantial frío y un río, correspondientes a las épocas de estiaje (marzo) y lluvias (octubre) de los años 2023-2024. Los sitios de muestreo se seleccionaron de manera que representaran todos los sectores que presentan distintas condiciones ambientales y la influencia de las actividades humanas en la zona de estudio. En cada sitio se recolectaron simultáneamente muestras destinadas al análisis de diatomeas, la medición de parámetros fisicoquímicos *in situ* y la determinación de la composición hidrogeoquímica del agua. Los manantiales muestreados se localizan en zonas con distintos usos antrópicos, incluyendo áreas cercanas y dentro de balnearios (sectores Noreste y Este) (Fig. 7); un manantial llamado “Carano”, que es usado como centro de convivencia rodeado por cultivos de maíz (sector Norte); junto con manantiales empleados como baños comunitarios y con fines domésticos en los sectores Centro y Oeste.

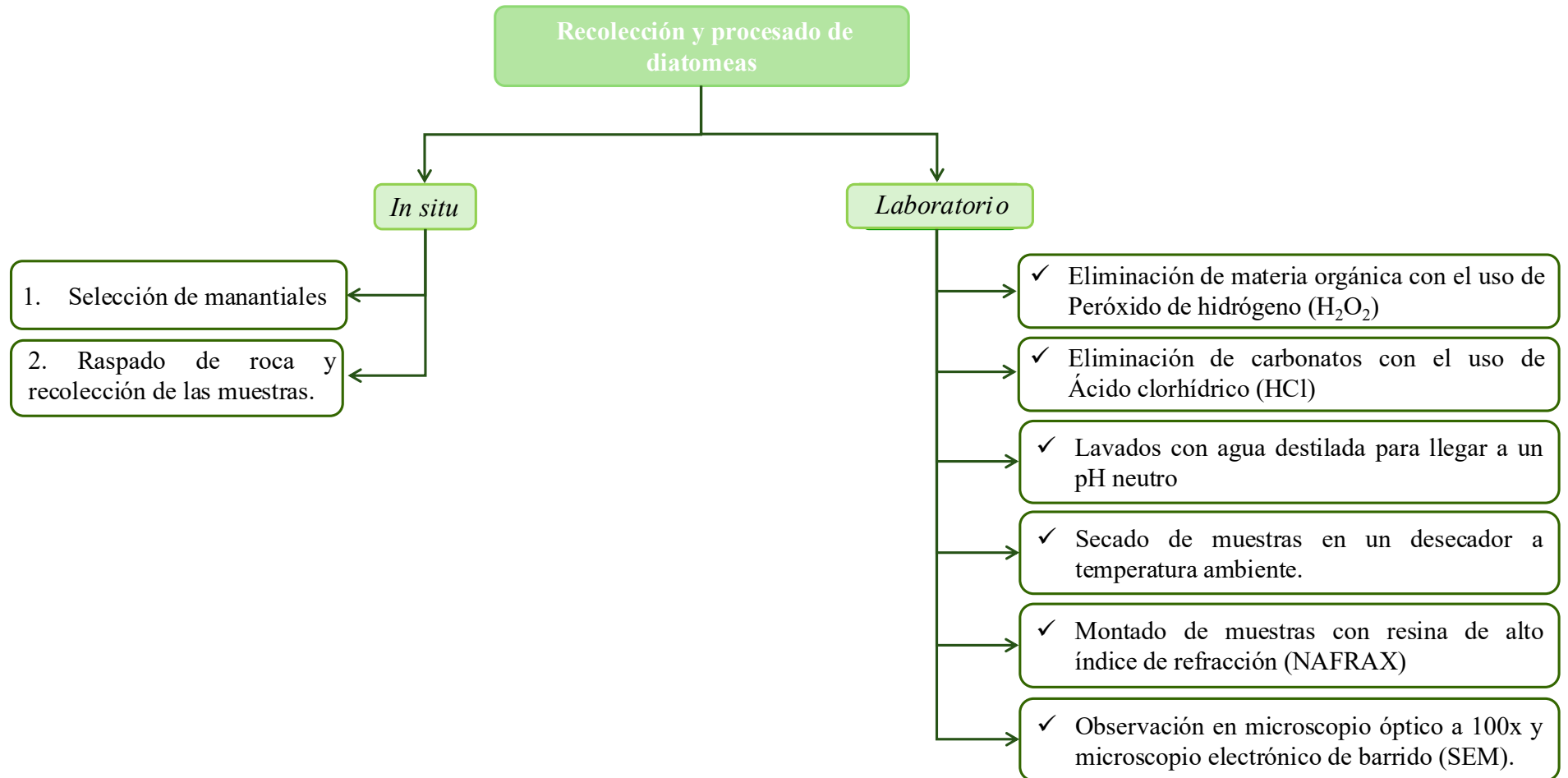
Figura 7. Imagen satelital donde se muestra la localización de los manantiales, clasificados por sectores: Norte (naranja), Noreste (verde), Este (azul), Centro (rojo) y Oeste (amarillo).



2.1 Procedimiento metodológico para el análisis de diatomeas

En la *Figura 8* se presenta un diagrama de flujo que resume las etapas del procedimiento metodológico aplicado al análisis de diatomeas.

Figura 8. Esquema sintetizado de la metodología realizada para la colecta y procesado de diatomeas.



2.1.1 Muestreo y preservación de las muestras

Los criterios para la selección de los sitios de muestreo fueron:

- Presentar una fuente de luz directa o constante (*Fig. 9*)
- Presencia de actividad humana en los alrededores
- Existencia de microhábitats en los manantiales

Figura 9. Manantiales seleccionados con emanaciones hidrotermales, luz directa y presencia de actividad humana.



Una vez seleccionados los manantiales, se procedió a realizar la técnica propuesta por Rumeau & Coste (1988) donde los autores describen el proceso de recolección de muestras en superficies duras *in situ*.

Primeramente, se seleccionaron rocas, hojas, o cualquier material sólido de al menos 10 cm³ que pudiera presentar material algal, con los criterios anteriormente mencionados. Con ayuda de un cepillo dental, se raspó circularmente la superficie de la roca, ejerciendo fuerza moderada con el fin de desprender el material adherido; éste se depositó en un frasco de plástico con capacidad de 50 ml. Para garantizar un buen muestreo, se raspó repetidamente la roca y se rasparon otros materiales sumergidos, con la finalidad de obtener todo el material algal posible representativo del sitio y no solo una parte. Las muestras fueron etiquetadas con datos de campo: clave de identificación y número de muestra (*Fig. 10*).

2.1.2 Procesado y análisis de diatomeas

Las muestras recolectadas en campo fueron procesadas y analizadas en el laboratorio de petrografía del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra “Víctor Hugo Garduño Monroy”, donde se realizaron la limpieza, el montaje, la identificación taxonómica y el análisis cuantitativo de las diatomeas presentes en cada muestra.

Figura 10. Proceso de muestreo y resguardo de las muestras.



2.1.2.1 Limpieza y preparación de las muestras

Inicialmente, las muestras fueron sometidas a un proceso de limpieza química con la finalidad de conservar únicamente las frústulas silíceas de las diatomeas. Se usaron vasos de precipitados de 300 mL, que fueron etiquetados con la clave correspondiente a cada sitio, y se procedió a vaciar la muestra para su preparación (Fig. 11).

Figura 11. Vasos de precipitados con muestra para su procesamiento.



Los vasos de precipitados fueron colocados sobre una parrilla eléctrica para su calentamiento controlado. Se agregaron gradualmente 50 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% v/v, en incrementos de 10 mL (Fig. 12). Con el uso de un termómetro de vidrio se revisó constantemente que la muestra no sobrepasará los 100 °C culminando en la evaporación (llegando aproximadamente

a los 25 mL) sin reacción alguna al peróxido, con el objetivo de eliminar la materia orgánica e impurezas presentes en las muestras.

Figura 12. Muestras tratadas con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para la eliminación de materia orgánica.



Una vez concluida la reacción anterior, las muestras, mantenidas sobre la parrilla eléctrica, fueron tratadas con 50 mL de ácido clorhídrico (HCl) (Fig. 13), adicionados gradualmente en incrementos de 10 mL. Siguiendo el mismo procedimiento descrito previamente, el proceso se llevó a cabo bajo control de temperatura, evitando que esta superara los 100 °C hasta alcanzar la evaporación, con el fin de eliminar compuestos carbonatados.

Figura 13. Tratamiento con ácido clorhídrico (HCl) para eliminación de carbonatos; algunas muestras presentan baja efervescencia previa a la reducción de volumen.



Una vez sometidas las muestras al tratamiento ácido, se retiraron de la parrilla eléctrica y se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante algunos minutos. Posteriormente, se aforaron las muestras mediante la adición de agua destilada hasta completar el volumen del vaso de precipitados. Los recipientes fueron cubiertos con película Parafilm para evitar la contaminación de las muestras (*Fig. 14*).

Durante los 6 días posteriores, una vez que los sedimentos se encontraban completamente asentados, fueron decantados y se añadió agua destilada, repitiendo este procedimiento diariamente con el objetivo de reducir la acidez residual de las muestras.

Figura 14. Muestras durante los lavados con agua destilada.



Al sexto día, se midió el pH mediante tiras indicadoras, registrándose un valor cercano a 5, por lo que las muestras fueron sometidas a dos cambios de agua adicionales hasta alcanzar un pH cercano a la neutralidad (≈ 7). Tras no observarse variaciones significativas en el pH, se procedió al montaje de las láminas para su observación microscópica.

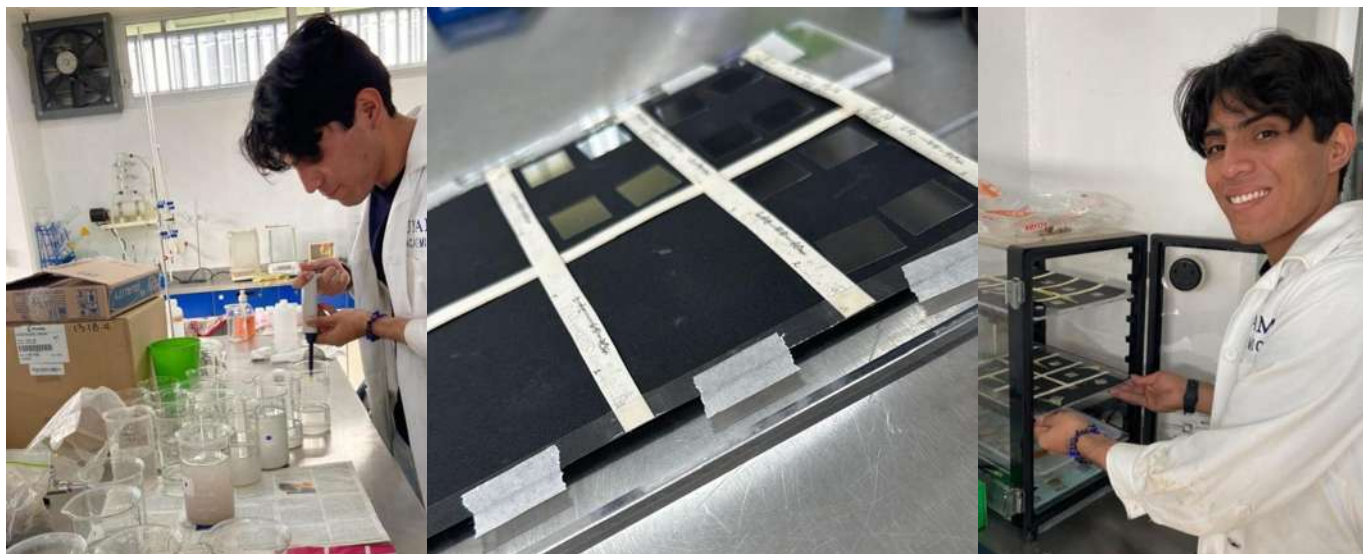
2.1.2.2 Montaje y observación microscópica

Con ayuda de una micropipeta volumétrica de 200 microlitros, equipada con puntas intercambiables estériles, se extrajeron 3 microlitros de cada muestra, realizando preferentemente movimientos circulares desde el centro hacia los extremos del recipiente para garantizar la homogeneidad de la suspensión. La gota fue distribuida uniformemente sobre un cubreobjetos limpio. Posteriormente, los cubreobjetos se dejaron secar en un desecador, a temperatura ambiente. Los cubreobjetos fueron colocados sobre charolas planas para evitar la concentración de valvas en zonas específicas. Finalmente, los cubreobjetos fueron etiquetados con su respectiva clave de identificación (*Fig. 15*).

Posterior al secado de los cubreobjetos, el medio utilizado para el montaje Naphrax fue calentado a baño María sobre una parrilla eléctrica, con el objetivo de reducir su viscosidad y facilitar su manipulación, dado su alto índice de refracción (~ 1.7). De manera simultánea, los portaobjetos

fueron precalentados para favorecer la correcta dispersión del medio de montaje. Subsecuentemente, se depositó una gota de Naphrax sobre cada portaobjetos y, una vez alcanzada la temperatura adecuada, se colocó el cubreobjetos con la muestra seca en contacto con la resina, aplicando una ligera presión para permitir la distribución homogénea del medio de montaje sobre el área del cubreobjetos y evitar la formación de burbujas de aire.

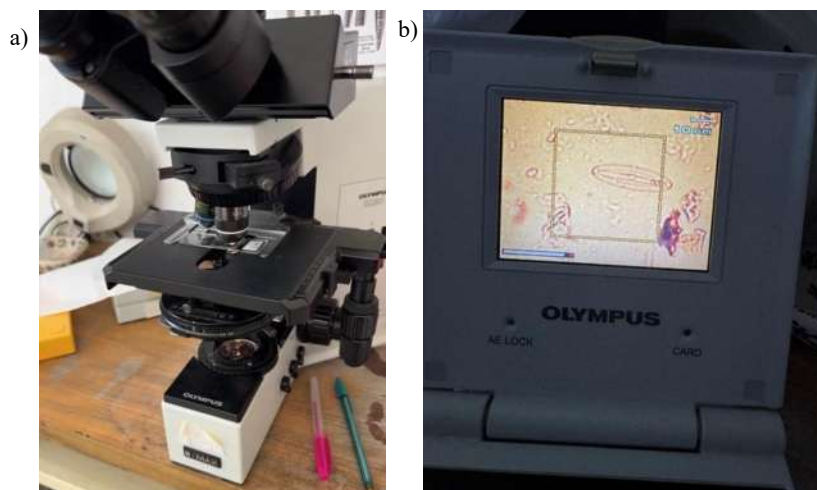
Figura 15. Montaje de muestras para su desecación.



Para la elaboración del inventario taxonómico, se contó con información académica especializada en micropaleontología durante el desarrollo del posgrado impartida por la Dra. Isabel Israde Alcántara, enfocada en la descripción de la estructura y ultraestructura de las diatomeas, así como en su descripción taxonómica.

Una vez montadas las muestras, la identificación de las especies presentes se realizó mediante un

Figura 16. Elementos usados para el conteo y observación de las valvas: a) Microscopio óptico Olympus BX50, b) Cámara fotográfica Olympus DP12.

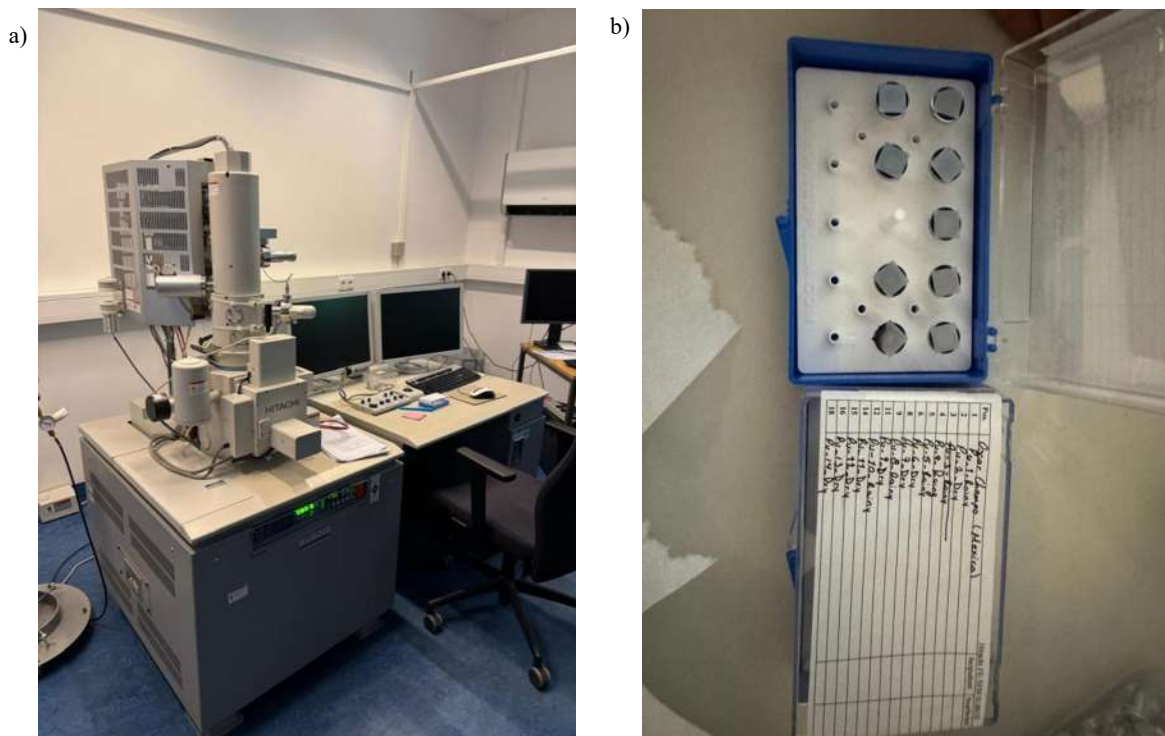


microscopio óptico Olympus BX50, equipado con un objetivo de inmersión de 100x (Fig. 16a), graduado en micras, lo que permitió obtener de mediciones precisas de las valvas observadas. El sistema óptico cuenta con una cámara fotográfica Olympus DP12 (Fig. 16b), lo que facilitó el registro fotográfico de los frústulos.

Adicionalmente, para una mejor observación del

arreglo ornamental y la ultraestructura de los frústulos, se empleó un microscopio electrónico de barrido (MEB) del laboratorio del Instituto de investigaciones en Metalurgia y Materiales (IMM) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y el MEB del Jardín Botánico de Berlín, Alemania (Fig. 17a).

Figura 17. Material necesario para la observación detallada de la valva: a) Microscopio electrónico de barrido y b) Muestras montadas para su observación.



2.1.2.3 Identificación taxonómica

La identificación taxonómica de diatomeas se realizó con base en literatura taxonómica clásica y actualizada, tales como 4 tomos de (Krammer & Lange-Bertalot, 1986 – 1999, *Diatom of Research* y la consulta de material bibliográfico especializado y colecciones de referencia del Museo de Algas de Berlín, así como bases de datos taxonómicas actualizadas como AlgaeBase y Diatoms of North America. La mayoría de los organismos fueron identificados a nivel especie; no obstante, en algunos taxones solo fue posible identificarlos únicamente a nivel género o afinidad, debido a que las características morfológicas no permitieron una determinación específica confiable. Los criterios de identificación incluyeron la forma y simetría de las valvas, sus dimensiones y la disposición de las estrías, así como la presencia y tipo de rafe.

2.1.3 Análisis ecológico y estadístico

Se contaron al menos 200 valvas por muestra, con la finalidad de obtener una representación adecuada de la composición y abundancia de la comunidad de diatomeas.

A partir de este conteo, se calculó la abundancia relativa de cada taxón,

$$AR_i = \left(\frac{n_i}{N}\right) \times 100$$

Donde:

AR_i = Abundancia relativa del taxón i (%)

n_i = Número de valvas del taxón i en la muestra

N = Número total de valvas contadas en la muestra

Así como, su frecuencia relativa

$$FR_i = \left(\frac{f_i}{F}\right) \times 100$$

Donde:

FR_i = Frecuencia relativa del taxón i (%)

f_i = Número de muestras en las que está presente el taxón i

F = Número total de muestras analizadas

Mismas que fueron utilizadas en los análisis estadísticos y multivariados aplicados.

2.1.3.1 Análisis de diversidad

Las medidas de diversidad tienden a ser indicadores del bienestar de los entornos ecológicos debido a dos componentes: la variedad y la abundancia relativa de especies. Los índices derivados de la abundancia proporcional ofrecen un enfoque alternativo para medir la diversidad, estos índices son denominados también como índices de heterogeneidad, ya que consideran la uniformidad y la riqueza de especies (Magurran, 1988). Los índices utilizados en el presente trabajo son:

➤ Índice de Shannon (H')

Este índice parte de dos principios: el primero, que los individuos se muestrean aleatoriamente en función de una población indefinidamente grande; el segundo, que todas las especies se encuentran representadas en las muestras. Valores altos indican una mayor diversidad ligada a una distribución más equitativa de las valvas, por otro lado, valores bajos reflejan la dominancia de uno o pocos taxones (Magurran, 1988).

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

Donde:

p_i = Proporción de la especie i respecto al total

S = Número total de especies

➤ Índice de Simpson (D)

Este índice mide la dominancia, ya que considera la abundancia de las especies más comunes, en lugar de brindar una medida de riqueza. El índice de Simpson se inclina por las especies más abundantes de la muestra, midiendo la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar de una población grande pertenezcan a la misma especie (Magurran, 1988).

$$D = \sum_{i=1}^S p_i^2$$

➤ *Índice de Margalef*

Este indicador mide la riqueza de especies, sensible al tamaño de muestras, es usado en conjunto con índices de uniformidad o cambios en especies dominantes. El índice de Margalef es calculado por (Gamito, 2010):

$$d = \frac{S - 1}{\ln(N)}$$

Donde:

S = número de especies

N = número total de individuos en la muestra

➤ *Equitatividad de Pielou (J')*

Este índice mide qué tan uniforme es la distribución de los individuos entre las especies, independientemente de la riqueza; el autor considera la Equitatividad como un componente esencial para interpretar correctamente los índices de diversidad (Magurran, 1988).

$$J' = \frac{H'}{\ln(S)}$$

Donde:

H' = Índice de Shannon

$\ln(S)$ = Valor máximo medido

Los índices de Shannon, Simpson y de Equitatividad de Pielou fueron calculados en el software R, utilizando funciones del paquete “*vegan*”, a partir de matrices de abundancia de diatomeas por muestra, las cuales fueron internamente convertidas a proporciones relativas.

2.1.3.2 *Análisis multivariados*

Para evaluar la similitud en la composición de la comunidad de diatomeas entre muestras y temporadas, se realizaron los siguientes análisis multivariados basados en matrices de abundancia relativa, en el software R, usando el paquete “*vegan*”.

➤ *Análisis de agrupamiento jerárquico*

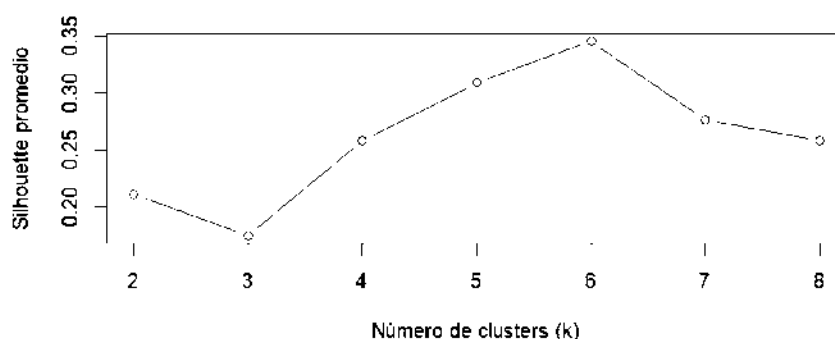
El análisis de agrupamiento jerárquico es un enfoque basado en una matriz de similitudes o disimilitudes entre pares de puntos. Este tipo de *clúster* se realiza de manera iterativa y por etapas, fusionando progresivamente las unidades análogas mediante distintos criterios de enlace, como distancia mínima, máxima o media (Rojas, 2022).

Un dendrograma es la representación gráfica binaria del análisis de agrupamiento jerárquico y se expresa como un árbol ramificado que ilustra la estructura de los grupos formados. En este esquema, las longitudes paralelas al eje principal son proporcionales a los valores de

disimilitud al que se fusionan los grupos o unidades, mientras que los segmentos perpendiculares al eje tienen una longitud arbitraria para una visualización más clara.

Con la finalidad de conocer el número óptimo de agrupaciones que mejor describan la estructura de los datos, se aplicó el índice promedio de Silhouette, permitiendo identificar el número de grupos representativos a partir del valor máximo, tal como se observa en la *Figura 18* (Bakker, 2026).

Figura 18. *Promedio Silhouette, muestra el punto recomendable de agrupaciones para el clúster y NMDS, en este caso 6.*



➤ *Análisis de ordenación no métrica multidimensional*

El escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) es una técnica de ordenación basada en medidas de disimilitud, cuyo objetivo es sintetizar las diferencias entre pares de unidades de muestreo a partir de múltiples variables de respuesta. Este método asigna coordenadas espaciales a las muestras de tal manera que aquellas con mayor similitud en la matriz de distancias originales se representen juntas en el espacio de ordenación, mientras que las muestras con mayor disimilitud se dispongan a mayor distancia en el gráfico (Bakker, 2026).

Para la realización del NMDS se seleccionó la distancia de Bray-Curtis, ampliamente utilizada en estudios ecológicos que emplean datos de abundancia.

➤ *Mapas de calor*

Es una representación gráfica bidimensional, dispuesta en una matriz de celdas, donde cada celda corresponde a un valor específico de la base de datos original y se codifica mediante una escala de colores en función de su magnitud. Este tipo de gráfico puede incluir diversos componentes, como títulos, etiquetas en filas y columnas, dendrogramas y anotaciones, los cuales se colocan de manera opcional en cualquiera de los 4 lados del mapa.

La incorporación de dendrogramas permite reordenar las filas y/o columnas de la matriz, agrupando aquellas con patrones similares, facilitando la identificación e interpretación visual de las asociaciones y tendencias a partir de la distribución de colores del mapa (Gu, 2022).

2.1.3.3 *Relación entre diatomeas y variables fisicoquímicas*

Para la interpretación inicial de la relación entre las diatomeas y las variables fisicoquímicas de los manantiales, se elaboraron gráficos de dispersión utilizando únicamente las especies clasificadas como dominantes. Estos gráficos tuvieron un carácter exploratorio y permitieron visualizar de manera preliminar el comportamiento y respuesta de las especies frente a los principales gradientes ambientales.

➤ Análisis de Correspondencia Canónica (CCA)

El análisis de promedio recíproco, también denominado análisis de correspondencias (CA) es una técnica multivariada que busca maximizar la correspondencia entre dos ordenaciones: una basada en las muestras, a partir de promedios ponderados de valores de las especies, y otra basada en las especies, calculada mediante promedios ponderados de los valores de las muestras. Este método se fundamenta en el análisis de valores propios y permite resumir la estructura de los datos ecológicos en un espacio de menor dimensión. Entre sus principales extensiones se encuentran el análisis de correspondencia destendido (CDA) y el análisis de correspondencia canónica (CCA).

El análisis de correspondencia canónica (CCA) es un método de ordenación que incorpora un conjunto adicional de variables explicativas, lo que lo convierte en una técnica directa o restringida. Su objetivo es maximizar la correlación entre la distribución de las especies y las puntuaciones de muestras en función de las variables ambientales medidas, enfocándose únicamente en aquellos aspectos de la estructura de la comunidad que están relacionados con dichos gradientes ambientales (Bakker, 2026).

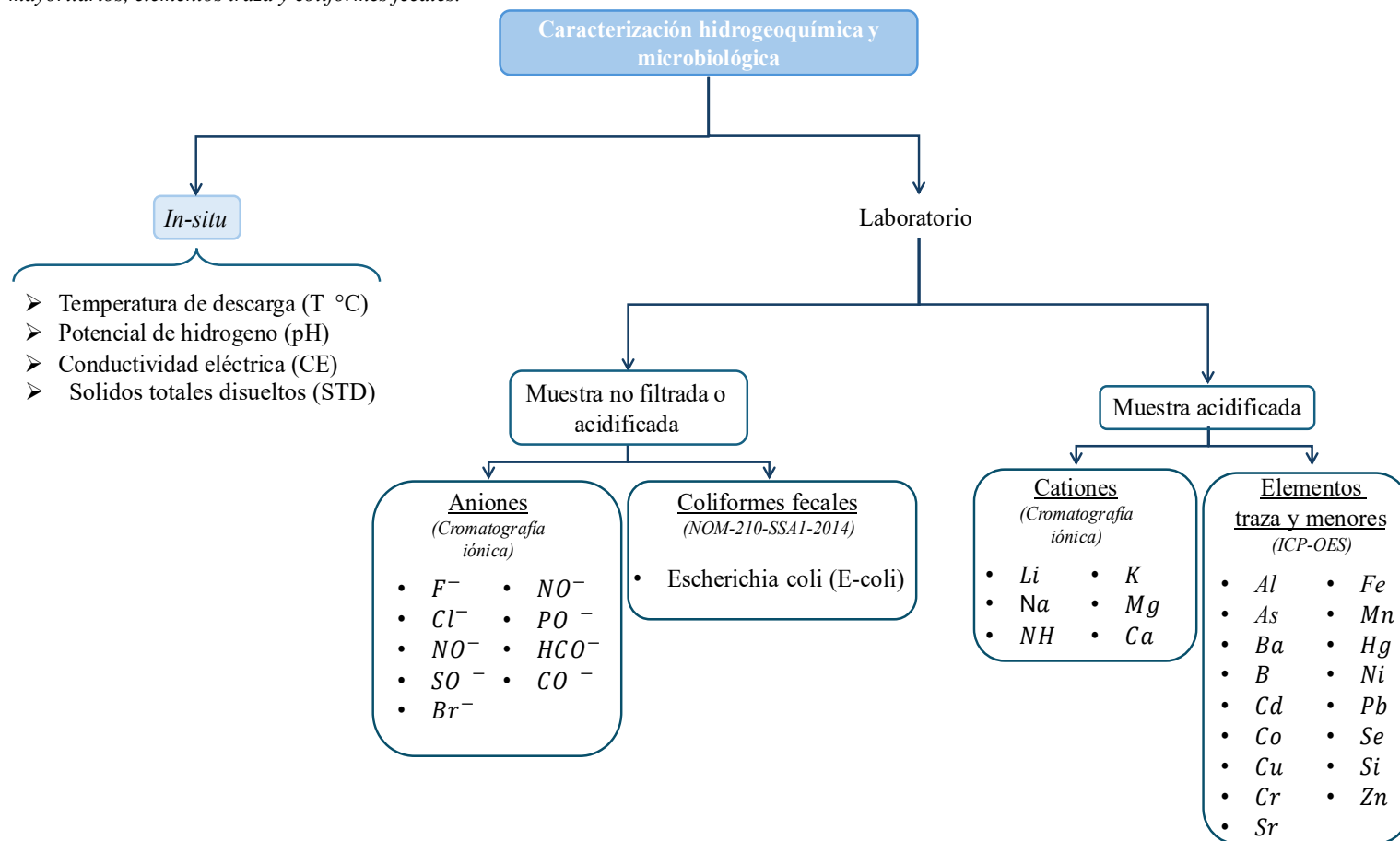
Con el propósito de analizar el comportamiento de las especies ecológicamente representativas, el CCA se realizó considerando únicamente las especies dominantes y subdominantes. Los CCA correspondientes a la temporada de estiaje mostraron una fuerte colinealidad entre los aniones, cationes y elementos traza; por ello, se seleccionaron únicamente aquellos parámetros que no representaron este problema para su inclusión directa en el modelo y su representación mediante vectores continuos.

Adicionalmente, las variables que mostraron colinealidad fueron incorporadas de manera complementaria como vectores puntuados, con el fin de explorar su asociación con la comunidad de diatomeas en relación con los parámetros principales incluidos en el análisis.

2.2 Procedimiento metodológico para el análisis hidrogeoquímico

La metodología empleada para la caracterización hidrogeoquímica de los manantiales se estructuró en una serie de etapas consecutivas, desde la obtención y el tratamiento de datos hasta su análisis e interpretación. La *Figura 19* presenta un diagrama metodológico que resume las principales etapas de la obtención y del procesamiento.

Figura 19. Esquema general de la metodología empleada para la caracterización hidrogeoquímica de los manantiales, incluyendo el análisis de iones mayoritarios, elementos traza y coliformes fecales.



2.2.1 Caracterización hidrogeoquímica de los manantiales

Se seleccionaron un total de 16 manantiales termales, un río y un manantial (Carano), de acuerdo con los criterios de selección previamente establecidos en la metodología para el análisis de cuerpos de agua, enfocados en la distribución y abundancia de diatomeas. El muestreo se llevó a cabo durante los meses de marzo y octubre de los años 2023-2024. No obstante, durante la campaña correspondiente a la temporada de estiaje, el acceso a algunos sitios fue restringido por razones de seguridad, derivadas de un conflicto reciente en la zona, por lo que las condiciones durante esos días no eran favorables para realizar trabajo de campo en los puntos localizados en las inmediaciones del balneario “Los Arcos” (ARC-C1 a ARC-C2), el manantial del rastro (RAS), los sitios ubicados en la zona del Centro de Rehabilitación Integral de Puruándiro (CRIP) CRIP-M y CRIP-C, y aquellos situados en la zona de Jeroche (JER-H y JER-B), todos ellos pertenecientes a los sectores Centro y Oeste.

2.2.1.1 Medición de parámetros fisicoquímicos

Para la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua *in situ* se empleó un equipo multiparamétrico AQUA TROLL 600 (Fig. 20), el cual fue utilizado para registrar el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (STD). Previo a su uso, los sensores de pH y conductividad eléctrica fueron calibrados utilizando soluciones estándar de pH 4.01, 7.01 y 10.01, así como una solución patrón para conductividad eléctrica de 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con el fin de asegurar la confiabilidad de las mediciones.

Figura 20. Medición de los parámetros fisicoquímicos con el uso del multiparamétrico: a) AQUA TROLL 600; b) Visualización de las medidas de los parámetros al momento.

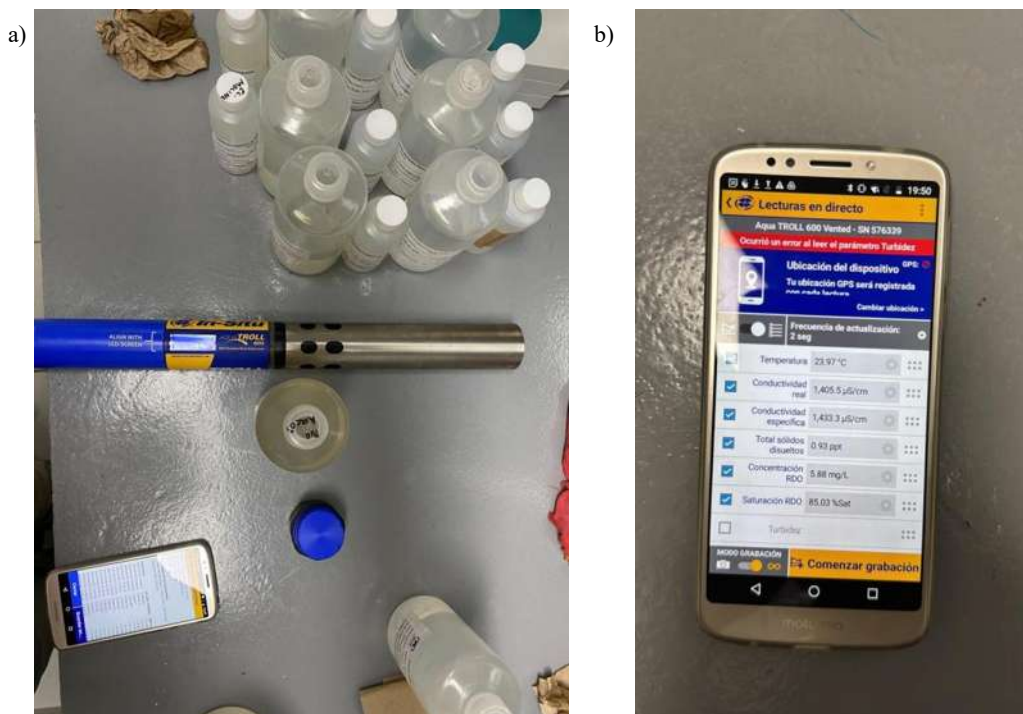


Figura 21. Termopar de doble entrada tipo K/J usado para medir temperatura.



La temperatura de descarga de los manantiales durante la temporada de estiaje fue determinada mediante un termopar de doble entrada tipo K/J (Fig.21), con rango de medición de 0 a 120 °C, marca EXTECH, el cual permitió registrar temperaturas elevadas asociadas a la descarga termal.

Durante la temporada de lluvias, las mediciones *in situ* de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos se realizaron utilizando un equipo multiparamétrico OAKTON PC 450 (Fig. 22), diseñado para el monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua en campo. Este instrumento integra sensores para la medición simultánea de múltiples parámetros, lo que facilitó la obtención de datos bajo condiciones ambientales propias de la época de lluvias.

Figura 22. Multiparamétrico usado para la medición de los parámetros fisicoquímicos durante el primer muestreo correspondiente al mes de abril.



2.2.1.2 Recolección y análisis químico en laboratorio

Para la determinación de aniones, cationes y elementos traza, se recolectaron muestras de agua en recipientes de polipropileno, utilizando frascos de 250 mL para aniones y, de 125 mL para cationes y elementos traza en cada manantial muestreado (Fig. 23c).

La colecta de muestras para el análisis de aniones se realizó siguiendo un protocolo estandarizado. Previo a la toma de la muestra, tanto el recipiente de colecta de 1 L como el frasco de polipropileno fueron enjuagados en tres ocasiones con el agua del propio manantial, con el fin de evitar

contaminación o mezcla de aguas residuales de muestreos previos (*Fig. 23 b, d*). Posteriormente, las muestras fueron etiquetadas y almacenadas en una hielera portátil para su conservación hasta su análisis en el laboratorio.

Figura 23. *Recolección de muestras para el análisis en el laboratorio de la Unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos del Instituto de Geofísica, UNAM, sede morelia. a) Manantial muestreado, b) Colecta de muestras para aniones, cationes y elementos traza, c) Frascos de polipropileno de 250 mL y 125 mL, d) Toma de colecta del río.*



Para la colecta de muestras destinadas al análisis de cationes y elementos traza, se siguió un procedimiento similar. Los frascos de polipropileno de 125 mL y el recipiente de colecta de 1 L fueron

enjuagados tres veces con el agua del manantial antes de la toma de la muestra. Antes de cerrar los recipientes, se verificó el valor de pH y, en aquellos casos en que este fuese mayor a 2, las muestras fueron acidificadas mediante la adición de ácido nítrico (HNO_3) ultrapuro, con el fin de inhibir la actividad biológica y mantener los cationes en solución. Finalmente, las muestras fueron etiquetadas y resguardadas en una hielera portátil para su preservación.

El procesamiento y análisis de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio de la Unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, sede Morelia. La determinación de aniones y cationes se realizó mediante cromatografía iónica, técnica basada en la separación de iones disueltos a través de procesos de intercambio iónico entre una fase móvil y una fase estacionaria, donde los iones son retenidos de manera reversible en la columna en función de sus propiedades fisicoquímicas (Trujillo et al., 2009).

La cuantificación de los elementos traza se efectuó mediante espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES), una técnica analítica empleada para la determinación cuantitativa de elementos químicos, que consiste en introducir la muestra en un plasma de argón, donde los átomos y los iones se excitan térmicamente y emiten radiación electromagnética a longitudes de onda características de cada elemento. La intensidad de esta emisión es proporcional a la concentración de los elementos presentes en la muestra (Margoshes & Scribner, 1970).

Adicionalmente, durante la temporada de estiaje se recolectaron muestras para la determinación de coliformes fecales en cada uno de los sitios de muestreo. Las muestras fueron obtenidas directamente en recipientes estériles tipo vaso copro, los cuales fueron sellados y etiquetados inmediatamente después de la colecta. Posteriormente, se mantuvieron en refrigeración y fueron trasladadas para su análisis en el laboratorio.

El análisis microbiológico se realizó en el Centro de Estudios del Medio Ambiente (CEMA), siguiendo los criterios y límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 para la identificación y cuantificación de coliformes fecales en el agua.

2.2.2 Análisis y representación hidrogeoquímica

Con el propósito de caracterizar la composición química del agua y evaluar las relaciones entre los principales iones, parámetros fisicoquímicos y elementos traza en los manantiales estudiados, se realizó un análisis hidrogeoquímico integral. Este análisis permitió identificar patrones composicionales, clasificar los tipos de agua y explorar posibles procesos geoquímicos que influyen en la evolución química de los manantiales.

Los diagramas de Piper y Stiff fueron elaborados mediante el software Diagrammes, mientras que el Análisis de Componentes Principales (PCA) se realizó utilizando el programa R.

2.2.2.1 Diagrama de Piper

Las aguas naturales suelen caracterizarse por una baja concentración de sustancias disueltas. Entre los cationes predominantes se encuentran el Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), y Potasio (K), mientras que los aniones más frecuentes incluyen Cloruros (Cl), Carbonatos (CO_3^{2-}), Bicarbonatos (HCO_3^-) y Sulfatos (SO_4^{2-}). Estos componentes generalmente se encuentran en equilibrio químico dentro de un sistema acuoso (Fetter, 2001).

Cuando la composición iónica del agua se expresa en términos de miliequivalentes por litro y se normaliza como porcentaje respecto a la suma total de cationes y aniones, cada uno de estos grupos representa necesariamente el 50% del total. Bajo este enfoque, la química del agua puede describirse considerando tres variables catiónicas y tres aniónicas principales, lo que permite su representación mediante un diagrama de coordenadas trilineales. Este tipo de gráfico refleja las proporciones relativas de los iones disueltos y no sus concentraciones absolutas, evitando así interpretaciones erróneas asociadas a diferencias de magnitud entre las muestras.

El diagrama de Piper está conformado por tres campos gráficos: dos diagramas triangulares ubicados en la parte inferior, uno destinado a los cationes (izquierda) y otro a los aniones (derecha), ambos con escalas expresadas en porcentajes, y un tercer campo central con forma de rombo, cuya escala se representa en 100 unidades. La posición de los puntos en los diagramas triangulares indica la proporción relativa de los principales constituyentes iónicos del agua, mientras que su proyección conjunta en el rombo central permite integrar esta información y definir el carácter químico global de cada muestra (Piper, 1944).

A partir de esta representación gráfica, es posible identificar las facies hidrogeoquímicas, entendidas como la firma química característica que adquiere el agua subterránea durante su circulación a través de diferentes unidades litológicas. Estas facies reflejan variaciones en la composición iónica entre distintos cuerpos de agua y pueden clasificarse de acuerdo con los iones dominantes presentes, utilizando el diagrama trilineal como herramienta principal (Fetter, 2001).

2.2.2.2 *Diagrama de Stiff*

Este tipo de representación gráfica facilita una visualización más clara de la composición iónica total del agua, ya que minimiza los efectos derivados de procesos de dilución o concentración. De esta manera, se mejora la diferenciación entre los distintos tipos de agua con base en su composición química.

El diagrama de Stiff se construye a partir de una línea vertical central que representa el valor cero, a partir de la cual se proyectan líneas horizontales hacia ambos lados. Los cationes se grafican en el lado izquierdo del eje central, mientras que los aniones se representan hacia el lado derecho. Cada ión se expresa utilizando la unidad de miliequivalentes por litro (meq/L).

Una vez que los valores de los iones han sido ubicados correctamente en el gráfico, estos se unen mediante segmentos lineales, dando lugar a una figura cerrada. La forma y el tamaño de estas figuras varían de acuerdo con la composición química del agua, generando patrones característicos que permiten distinguir entre diferentes tipos hidrogeoquímicos (Stiff, 1951). Los diagramas de Stiff son ampliamente utilizados como una herramienta de comparación visual entre diversas fuentes de agua, ya que permiten identificar similitudes y contrastes en la composición iónica de manera rápida y efectiva (Fetter, 2001).

2.2.2.3 *Análisis de componentes principales (PCA)*

El análisis de componentes principales (PCA) es una herramienta estadística ampliamente utilizada para explorar y resumir la variabilidad presente en conjuntos de datos que incluyen múltiples variables (Rojas, 2022). Este método comienza con la identificación de un eje lineal que se ajusta de manera óptima a la distribución de los datos, de tal forma que representa la mayor proporción posible de la variación total. Dicho eje recibe el nombre de primer componente principal y

representa una combinación lineal de las variables originales, a partir de la cual se determina la posición de cada muestra en el espacio multivariado.

Posteriormente, se calcula un segundo componente principal, perpendicular al primero, cuyo objetivo es explicar la mayor parte de la variabilidad residual. Al igual que el primero, este componente se obtiene mediante una combinación lineal de las variables originales y permite una nueva proyección de las muestras en función de sus valores originales.

Cada componente principal se asocia a un valor propio, el cual cuantifica la proporción de la varianza total explicada por dicho componente. El primer valor propio corresponde al componente que concentra la mayor variabilidad del conjunto de datos, mientras que los componentes subsecuentes explican fracciones decrecientes de la variación restante. Además, todos los componentes principales son estadísticamente independientes entre sí (Bakker, 2026).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Hidrogeoquímica

Se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de los manantiales muestreados durante las temporadas de estiaje y lluvias. Se describen los principales parámetros fisicoquímicos: temperatura, pH, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, la composición iónica mayoritaria, así como la concentración de elementos traza. Todos estos resultados se reflejan en gráficos y diagramas hidrogeoquímicos que permiten identificar patrones espaciales y temporales entre los manantiales estudiados.

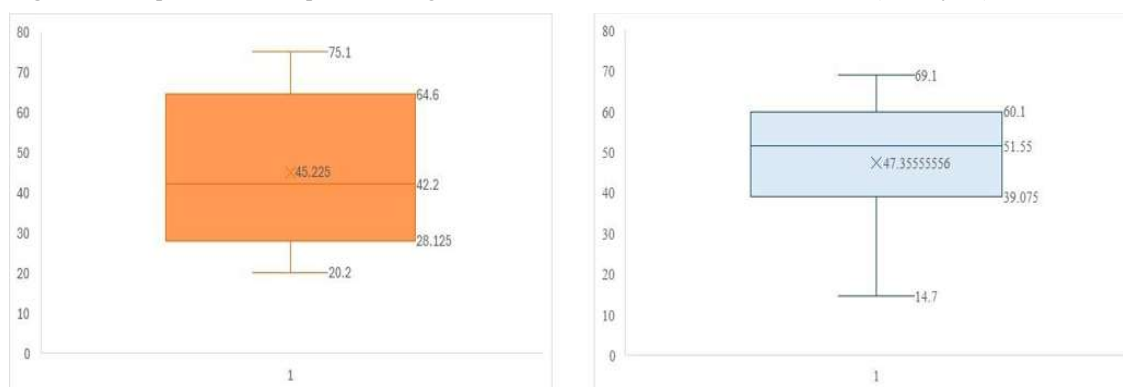
3.2 Clasificación térmica

Para la clasificación térmica fue necesario recurrir a la tabla de datos históricos mensuales de temperatura ambiental (*Tabla 2*) donde se observan temperaturas máximas promedio que van de 31° a 31.5 °C durante los meses de abril y mayo, así como temperaturas mínimas promedio de 6.4° a 7.1 °C correspondientes a los meses de diciembre y enero.

Tabla 3. Clasificación térmica de los manantiales termales de la Cabecera Municipal de Puruándiro.

Sitio	Estiaje		Lluvias	
	Clasificación	T °C	Clasificación	T °C
ARC-L	Alta T	33.3	Media T	19
ARC-R	Baja T	20.2	Baja T	14.7
PED-1	Alta T	54.4	Alta T	60.1
PED-2	Alta T	68	Alta T	60.1
PED-3	Alta T	79.7	Alta T	65
PED-4	Alta T	75.1	Alta T	67
PED-5	Alta T	61.3	Alta T	51.7
MOL	Alta T	42.2	Alta T	44.5
ARC-C1	Alta T	70	Alta T	69.1
ARC-C2	Alta T	44.8	Alta T	39.5
ARC-C3	Alta T	60.9	Alta T	57
ARC-C4	Alta T	49	Alta T	44.4
RAS	Alta T	47.5	Alta T	37.8
CRIP-C	Alta T	64	Alta T	53.8
CRIP-M	Alta T	60.5	Alta T	51.4
JER-B	Alta T	56.5	Alta T	52
JER-H	Alta T	46	Alta T	43.3
CAR	Media T	26.4	Media T	22

Se tomaron los datos de los meses de abril (temporada de Estiaje) y octubre (temporada de Lluvias), de acuerdo con las salidas de campo, para establecer los criterios de clasificación térmica de los manantiales, mostrados en la *Tabla 3*. Se clasificaron como manantiales de alta temperatura aquellos que superaron la temperatura máxima ambiental registradas para los meses de abril con 31 °C y octubre con 26 °C; los manantiales de baja temperatura, son aquellos con valores por debajo de la temperatura media mensual de abril (21.4 °C) y octubre (18.7 °C). Durante la temporada de estiaje, los valores de temperatura oscilaron entre 20.2 °C y 75.1 °C, con una media de 45.225 °C y una mediana de 42.2 °C (*Fig. 25a*). En la temporada de lluvias, la temperatura varió entre 14.7 °C y 69.1 °C, con una media de 47.4 °C y una mediana de 51.55 °C (*Fig. 25b*). La dispersión de los valores evidencia una alta heterogeneidad térmica entre los manantiales en ambas temporadas.

Figura 24. Boxplots de las temperaturas registradas in situ en los manantiales termales: a) Estiaje, b) Lluvias.

3.3 Caracterización fisicoquímica

Durante la temporada de estiaje, los manantiales registraron temperaturas con rangos muy amplios que van de 20.1 a 75.1 °C. En la temporada de lluvias, los valores oscilaron entre 19 y 69.1 °C. El pH varió de ligeramente ácido a ligeramente básico en ambas temporadas, con valores entre 6.05 y 7.4 en estiaje, mientras que en lluvias los valores fueron de 6.6 a 8.5. La conductividad eléctrica mostró fluctuaciones significativas, con rangos entre 252.03 y 1,988.37 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en estiaje y entre 696 a 1,885 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en lluvias. En cuanto a los sólidos totales disueltos, exhibieron concentraciones de 420 a 1,290 ppm en estiaje y de 320 a 1,130 ppm en lluvias. Los valores individuales por manantial se presentan en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos recolectados durante el trabajo de campo en ambas temporadas.

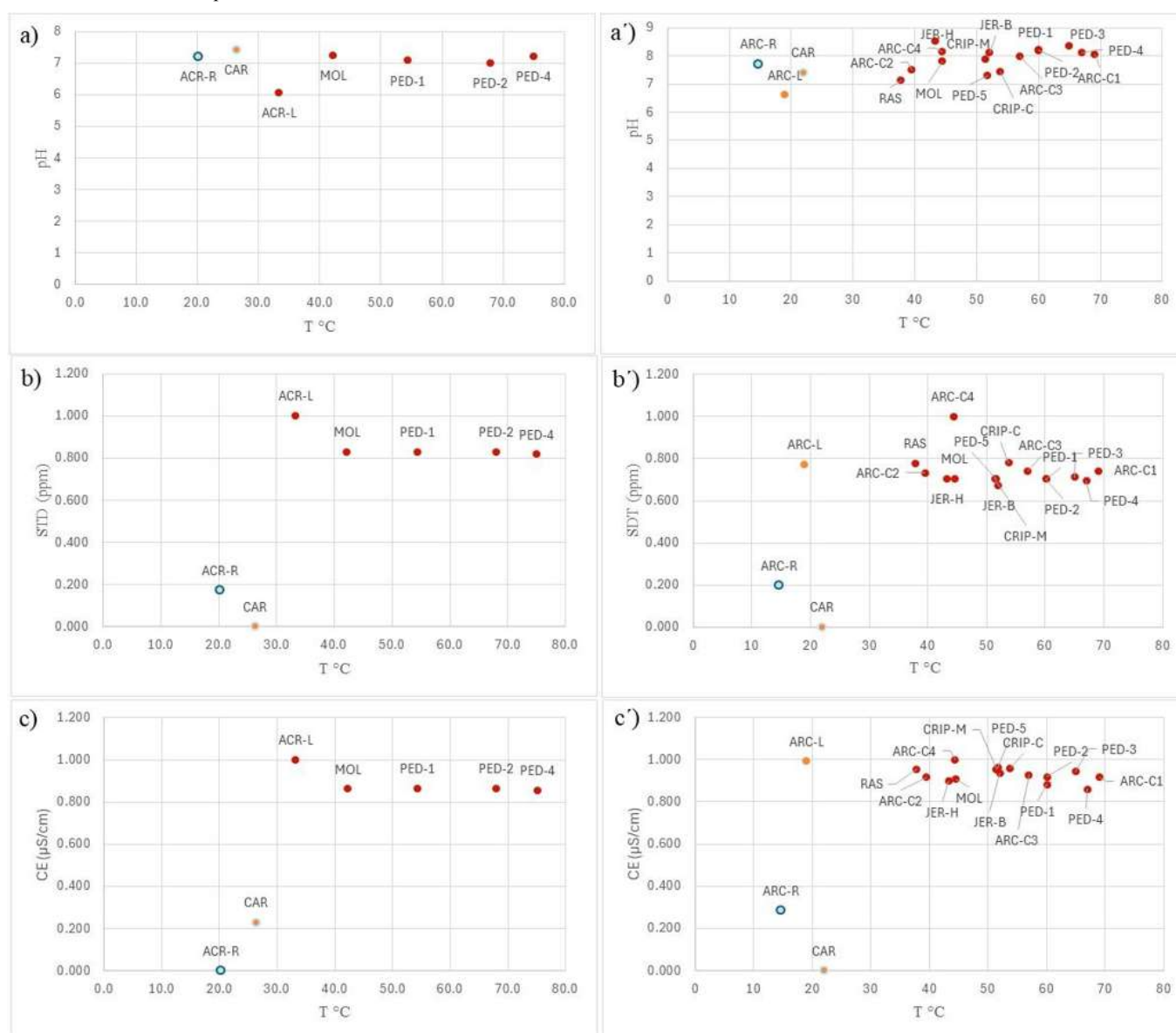
Clave de sitio	Lugar	T (°C)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (ppm)
<i>Temporada estiaje</i>					
ARC-L	Balneario "Los Arcos" (Lavaderos)	33.3	6.05	1988.37	1290
ARC-R	Río-Balneario "Los Arcos"	20.1	7.21	252.03	570
PED-1	Detrás del Balneario "El Pedregal"	54.4	7.07	1751	1140
PED-2	Detrás del Balneario "El Pedregal"	68	6.99	1751.91	1140
PED-4	Detrás del Balneario "El Pedregal"	75.1	7.21	1736.28	1130
MOL	"El Molino"	42.2	7.24	1748.23	1140
CAR	Carano	26.4	7.41	648.51	420
<i>Temporada lluvias</i>					
ARC-L	Balneario "Los Arcos" (lavaderos)	19	6.6	1869	900
ARC-R	Río-Balneario "Los Arcos"	14.7	7.7	696	320
PED-1	Detrás del Balneario "El Pedregal"	60.1	8.18	1691	830
PED-2	Detrás del Balneario "El Pedregal"	60.1	8.22	1751	830
PED-3	Detrás del Balneario "El Pedregal"	65	8.35	1791	840
PED-4	Detrás del Balneario "El Pedregal"	67	8.1	1653	820
PED-5	Detrás del Balneario "El Pedregal"	51.7	7.3	1823	830
MOL	"El Molino"	44.1	7.8	1733	830
ARC-C1	Contiguo al balneario "Los Arcos"	69.1	8.02	1748	870
ARC-C2	Contiguo al balneario "Los Arcos"	39.5	7.5	1748	860
ARC-C3	Contiguo al balneario "Los Arcos"	57	7.96	1767	870
ARC-C4	Contiguo al balneario "Los Arcos"	44.4	8.13	1885	1130

Continuación de la *Tabla 4* de parámetros fisicoquímicos*

Clave de sitio	Lugar	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	STD (ppm)
RAS	Manantial del rastro	37.8	7.13	1811	905.5
CRIP-C	Contiguo al CRIP	53.8	7.42	1817	908.5
CRIP-M	Contiguo al CRIP	51.4	7.88	1810	830
JER-B	Baños de "Jeroche"	52	8.1	1777	800
JER-H	Hervideros de "Jeroche"	43.3	8.5	1718	830
CAR	Carano	22	7.4	225.1	120

Se realizaron gráficos de dispersión con el propósito de observar la relación entre la temperatura y la conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD) y potencial de hidrógeno (pH), con el propósito de explorar su variación a lo largo del gradiente térmico de los manantiales (*Fig. 24*).

Figura 25. Gráficos de dispersión de conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH) y sólidos totales disueltos (STD) en función de la temperatura para las temporadas de estiaje (a - c) y lluvias (a' - c'). Los colores de cada uno de los puntos representan la clasificación térmica realizada en el apartado 3.2.



El pH utilizado en el estudio de aguas hidrotermales es un parámetro fundamental para comprender la composición química y las reacciones geoquímicas que ocurren en los sistemas termales (Stumm & Morgan, 1996). Este parámetro está relacionado con la interacción agua-roca, así como la disolución y precipitación de minerales (Ellis & Mahon, 1977). En los gráficos de pH en ambas temporadas (*Fig. 25 a-a'*), los puntos muestran un agua estable al estar en línea casi horizontal y con poca dispersión, con tendencia de aguas neutras a ligeramente básicas. Por otro lado, los diagramas de CE y STD (*Fig. 25 b-b', c-c'*) explican la cantidad de sales disueltas en los manantiales, observándose un aumento de estas concentraciones a altas temperaturas.

3.4 Aniones y cationes mayoritarios

El balance iónico (BI%) establece que, la suma algebraica de las cargas iónicas positivas y negativas debe ser equivalente. El porcentaje de error del balance es un criterio de control de calidad de los análisis químicos del agua. De acuerdo con Younger (2007) cuando el error del balance iónico es inferior al 5 %, los resultados pueden considerarse como confiables; valores entre 5 % y 15 % deberían manejarse con cautela, mientras que valores superiores al 15% sugieren una baja confiabilidad. En el presente estudio, todas las muestras presentaron un porcentaje confiable de 0.15 a 5.25 % (*Tabla 5*); solo un manantial sobrepasó el límite por 1.16 %, correspondiente a PED-2. Por tanto, todos los resultados pudieron ser interpretados con confiabilidad.

Para los aniones y cationes mayoritarios también se elaboraron diagramas de dispersión en función de la temperatura (*Fig. 26*). En el caso de los cationes, K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} mostraron una disminución de sus concentraciones con el incremento de la temperatura en ambas temporadas, al contrario que el Na^+ , que presentó concentraciones crecientes a temperaturas más elevadas (*Fig. 26*). Se destaca incremento el de K^+ en el manantial ACR-L (Lavaderos), así como una disminución en las concentraciones de Mg^{2+} y Ca^{+2} en CAR durante la temporada de lluvias.

En cuanto a los aniones, F^- , Cl^- y SO_4^{2-} mantuvieron concentraciones elevadas asociadas a las altas temperaturas (*Fig. 27*). NO_3^- presentó concentraciones bajas en ambas temporadas, aunque se identificó un valor máximo en CAR durante el estiaje, mientras que en la temporada de lluvias este anión mostró valores relativamente más altos para los manantiales ACR-C1, ARC-C2 y ACR-C3, referidos como tóxicos, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2017) con valores por arriba de 50 mg/L.

De forma semejante, la Organización Mundial de la Salud y la NOM-127SSA-2021 establecen un límite permisible para el F^- , con un valor de 1.5 mg/L. Por su parte, HCO_3^- , mantuvo concentraciones constantes respecto a la temperatura, aunque se observa un aporte adicional durante la temporada de lluvias en el manantial ARC-L.

Tabla 5. Resultados del análisis de elementos mayores en ambas temporadas.

Clave del sitio	Cationes (mg/L)					Aniones (mg/L)							%BI
	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	
Temporada de estiaje													
ARC-L	0.78	380.65	11.71	1.10	15.84	11.89	361.17	63.95	1.08	-0.51	358.35	-	-0.47
ARC-R	-0.54	126.88	24.26	14.25	28.47	1.20	42.41	10.68	-1.03	-0.51	447.68	-	-0.84
PED-1	0.60	333.96	9.88	1.12	13.84	12.18	308.99	58.89	-1.03	0.28	317.19	-	-0.38
PED-2	0.63	337.63	11.07	0.40	11.90	12.41	311.67	60.08	-1.03	-0.51	317.19	-	-0.57
PED-4	0.63	333.69	11.27	0.4	11.82	12.26	304.06	59.32	-1.03	-0.51	313.18	-	-0.15
MOL	0.62	337.13	10.23	0.91	11.57	12.26	308.21	60.24	-1.03	-0.51	317.19	-	-0.32
CAR	-0.54	50.12	8.57	24.74	34.24	0.643	28.92	29.01	-1.03	67.1	231.87	-	-2.09
LC	0.054	0.19	0.39	0.18	0.34	0.28	0.35	0.62	1.03	0.51	NA	-	-
Temporada de lluvias													
ARC-L	0.69	420.02	16.95	3.22	21.20	10.34	315.11	124.56	0.052	1.43	490.89	0.1e ⁻³	0.08
ARC-R	0.07	106.29	19.64	11.24	25.77	1.42	38.25	14.89	0.052	1.50	320.31	16.27	2.35
PED-1	0.57	378.08	10.28	0.46	10.44	11.39	287.72	58.93	0.052	1.39	333.70	16.27	4.84
PED-2	0.58	391.51	11.20	0.45	10.61	11.51	290.76	41.68	0.052	1.45	333.70	43.15	6.16
PED-3	0.59	392.54	11.68	0.45	10.77	11.62	294.89	42.94	0.052	1.54	384.00	18.35	4.61
PED-4	0.59	388.48	12.20	0.50	10.70	11.49	292.08	58.78	0.052	1.79	339.70	25.62	5.25
PED-5	0.61	395.10	12.49	0.68	11.36	11.61	297.22	60.04	0.052	1.46	384.00	2.39	4.65
MOL	0.57	394.10	10.06	1.06	10.85	11.58	293.41	57.23	0.052	1.52	384.00	9.06	4.52
ARC-C1	0.63	387.95	10.13	0.27	10.64	11.47	295.27	57.53	0.052	246.33	301.95	12.96	-4.02
ARC-C2	0.63	407.91	10.57	0.30	10.90	11.82	305.46	59.32	0.052	110.73	265.85	20.60	4.82
ARC-C3	0.62	403.47	10.52	0.30	10.77	11.71	302.33	58.90	95.72	69.95	288.00	20.96	1.95
ARC-C4	0.62	416.12	12.59	1.21	14.23	11.98	324.31	70.56	27.83	0.05	369.34	20.55	3.58
RAS	0.19	400.62	12.66	0.68	12.75	11.70	325.83	63.21	38.15	0.05	312.22	19.96	4.01
CRIP-C	0.12	393.09	11.64	0.66	12.82	11.30	304.04	57.65	26.76	0.05	345.43	11.00	4.50
CRIP-M	0.22	392.44	11.39	0.73	12.53	11.25	305.91	58.28	0.052	3.24	349.41	20.16	4.43
JER-B	0.53	393.96	3.62	0.26	13.11	11.31	295.34	59.65	0.052	1.07	345.43	42.12	4.16
JER-H	0.55	401.02	3.70	0.29	12.54	11.52	301.24	61.09	0.052	1.69	364.03	16.84	4.64
CAR	0.025	27.08	4.16	0.20	9.61	0.51	6.13	3.64	0.052	2.31	65.36	14.97	4.29
LC	0.05	0.04	0.08	0.20	0.20	0.03	0.04	0.13	0.104	0.10	NA	NA	-

Figura 26. Gráficos de dispersión en escala logarítmica base 10 de cationes en función de la temperatura para las temporadas de estiaje (a - d) y lluvias (a' - d').

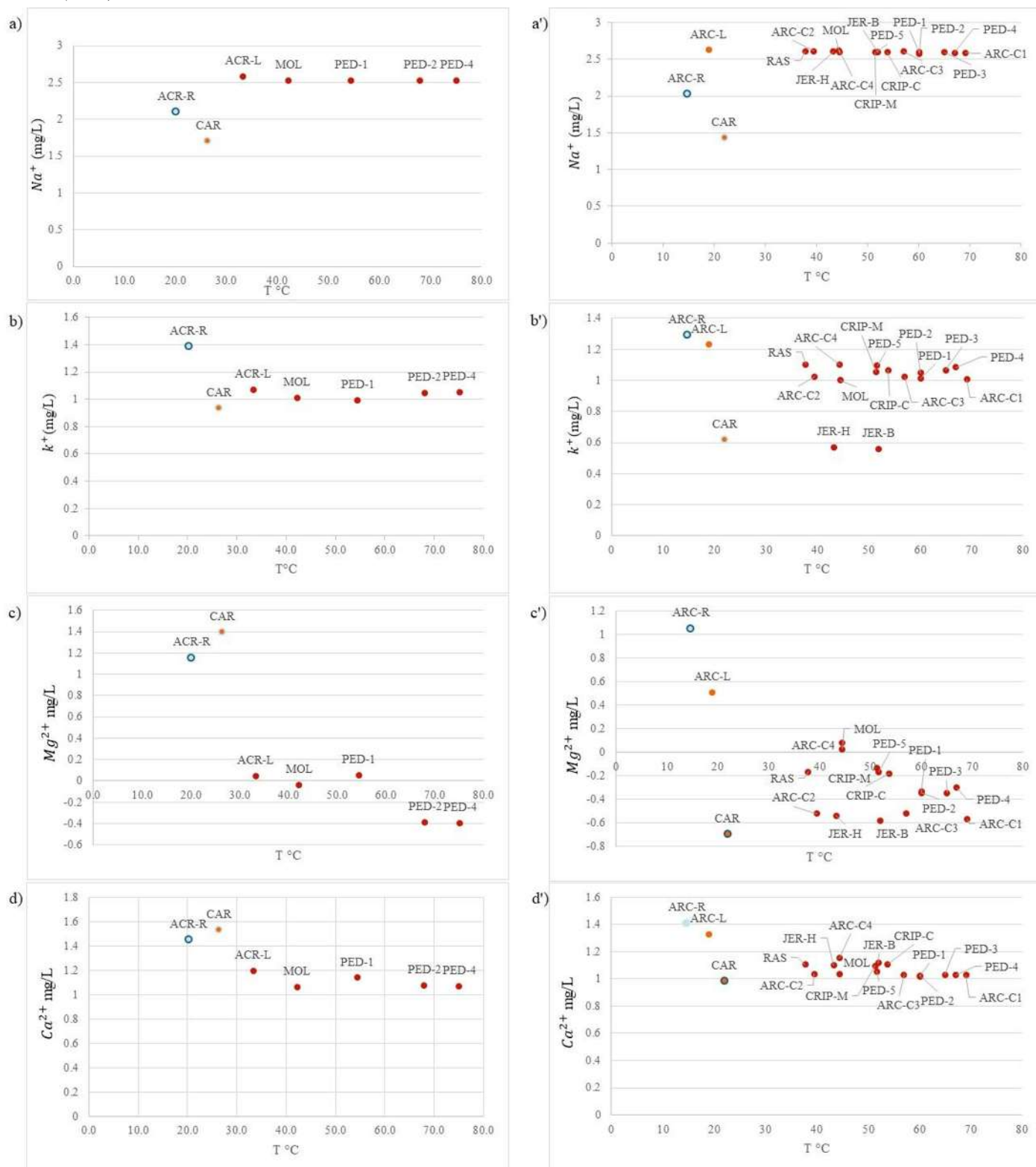
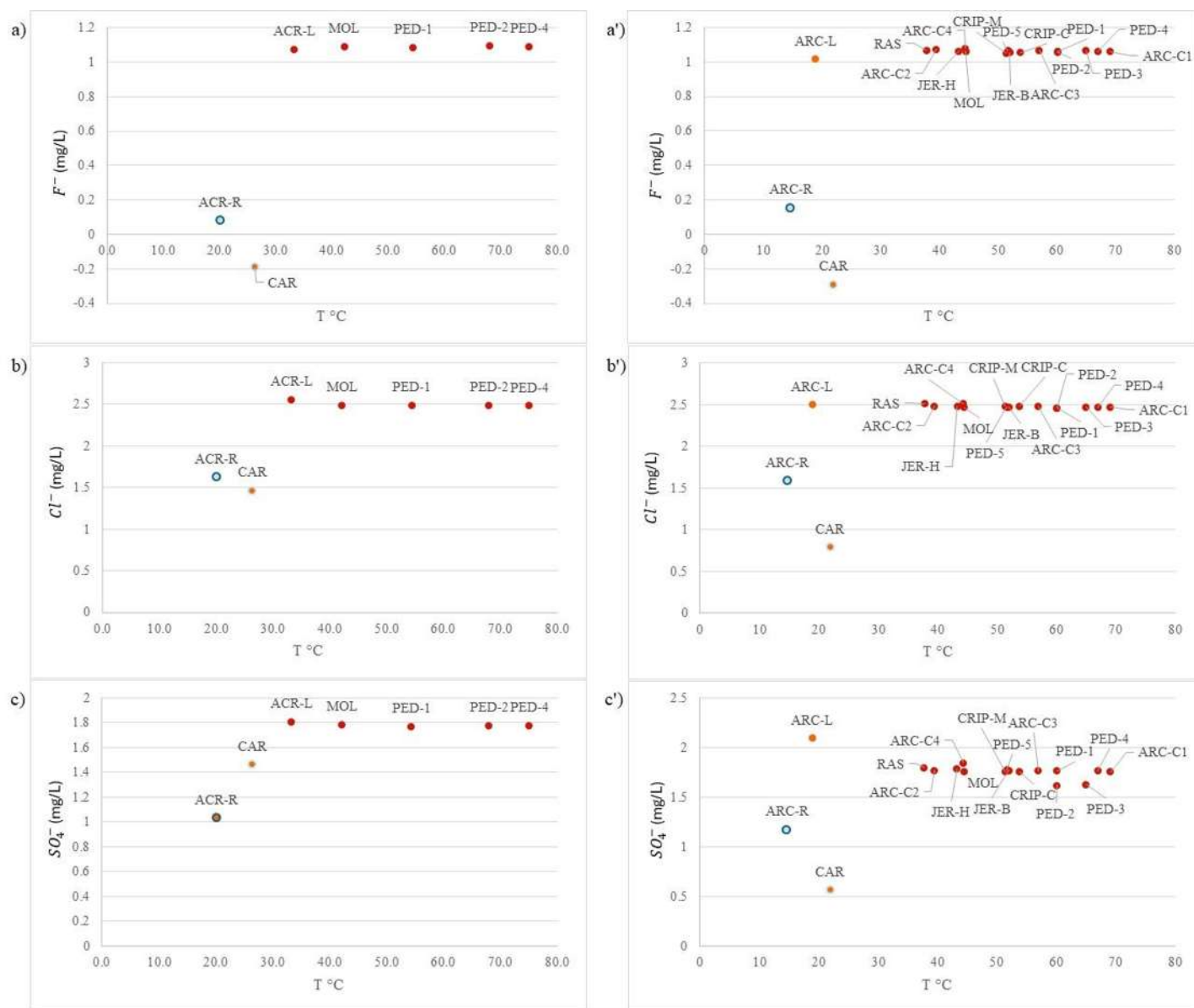
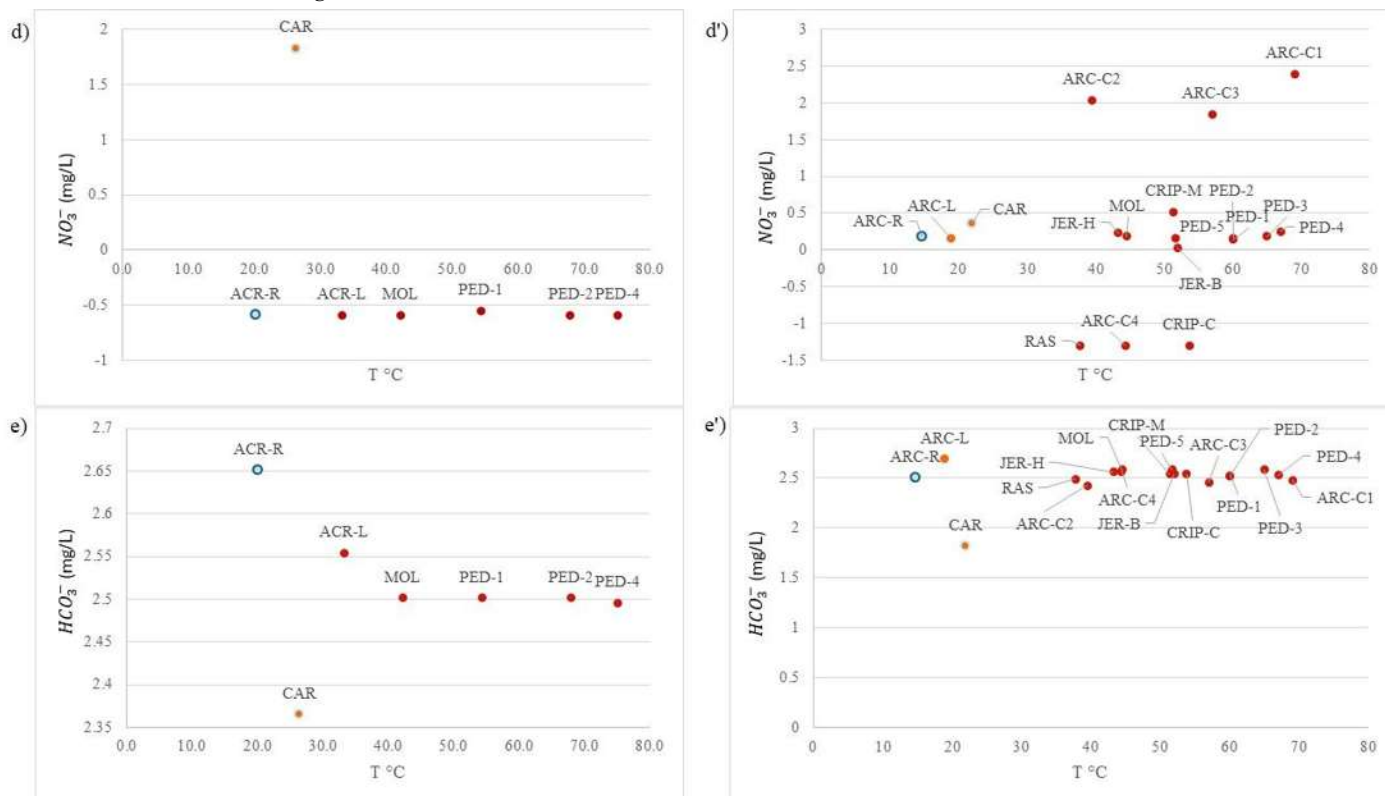


Figura 27. Gráficos de dispersión en escala logarítmica base 10 de aniones en función de la temperatura para las temporadas de estiaje (a - e) y lluvias (a' - e').



Continuación de la Figura 27*



3.5 Elementos traza

Las concentraciones de los elementos traza analizados durante las temporadas de estiaje y lluvias se presentan en la *Tabla 6*. Los resultados muestran variaciones en la distribución de dichos elementos entre ambas temporalidades, las cuales, se reflejan en los histogramas elaborados (*Fig. 28*).

Los valores obtenidos, se compararon con los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Diario Oficial de la Federación, 2022) y por la Organización Mundial de la Salud (2017).

Las concentraciones de Aluminio (Al) en la mayoría de los manantiales muestreados durante ambas temporadas fueron relativamente bajas (*Fig. 28a*). Sin embargo, los manantiales ARC-C4 y CAR presentaron valores por encima del límite permisible (0.20 mg/L) establecido por la norma NOM-127-SSA1-2021.

En el caso del Arsénico (As), la mayoría de los sitios superan el límite máximo permisible establecido por la norma mexicana que es de 0.025 mg/L, destacando JER-B y JER-H, correspondientes al sector Oeste, con valores cercanos a 0.180 mg/L (*Fig. 28b*). Por otro lado, la OMS establece un valor recomendable para agua potable de 0.01 mg/L, mismo que exceden todas las estaciones de colecta.

Los límites máximos permisibles de Hierro (Fe) establecidos por la norma mexicana para el uso y consumo humano de 0.30 mg/L, fue sobrepasado en el manantial RAS durante las lluvias (*Fig. 28c*).

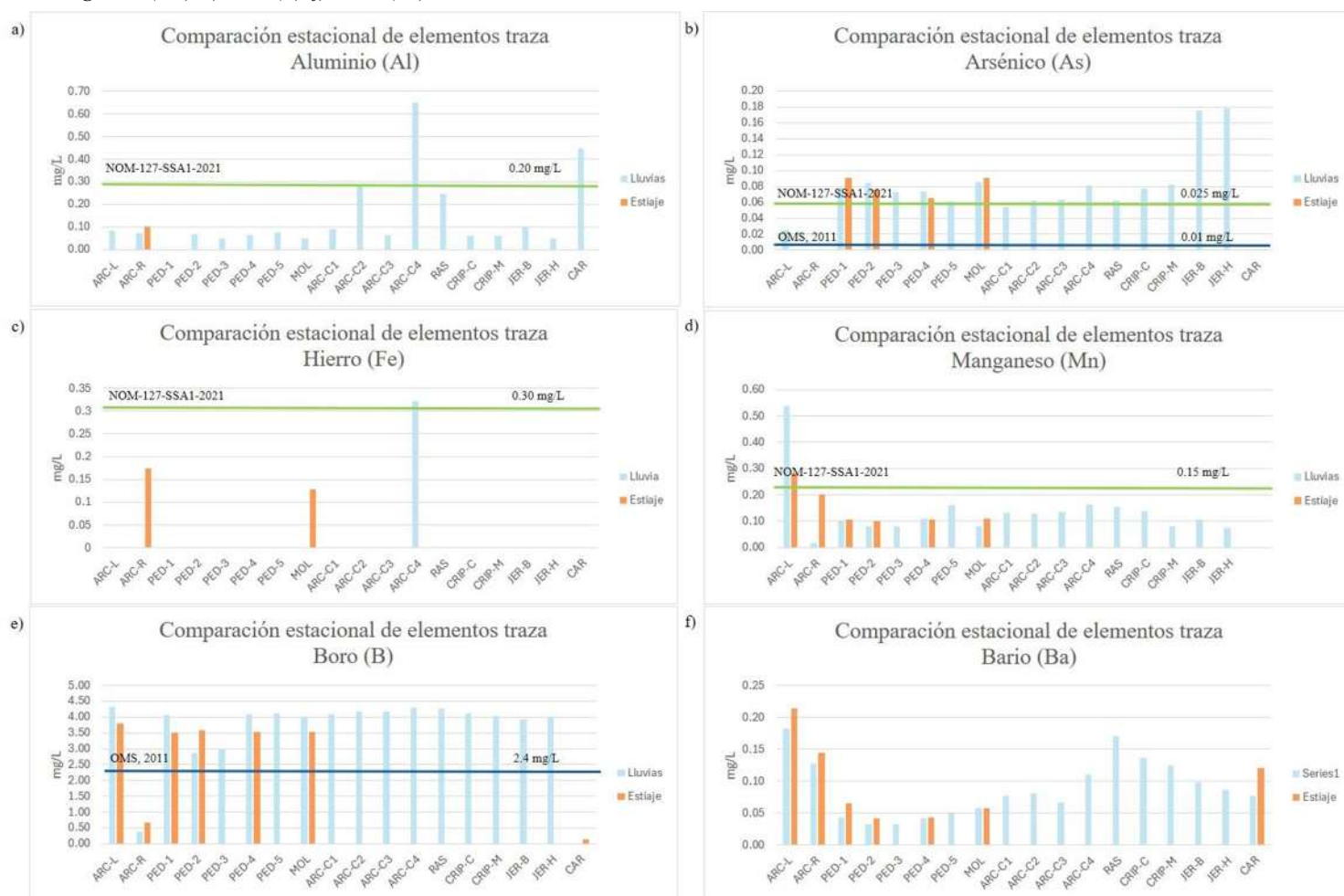
Tabla 6. Resultados del análisis de los elementos traza para ambas temporadas.

Clave del sitio	Aluminio (Al)	Arsénico (As)	Bario (Ba)	Boro (B)	Estroncio (Sr)	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Zinc (Zn)	Sílice (SiO ₂)
<i>mg/L</i>									
Temporada de estiaje									
ARC-L	0.025	0.01	0.214	3.81	0.298	0.1	0.281	0.05	179.203
ARC-R	0.1	0.01	0.144	0.658	0.287	0.175	0.203	0.05	241.387
PED-1	0.025	0.091	0.066	3.516	0.196	0.1	0.105	0.05	166.437
PED-2	0.025	0.076	0.042	3.582	0.206	0.1	0.101	0.05	164.986
PED-4	0.025	0.065	0.043	3.539	0.203	0.1	0.105	0.05	165.883
MOL	0.025	0.091	0.058	3.542	0.182	0.128	0.108	0.05	188.484
CAR	0.025	0.01	0.121	0.136	0.399	0.1	0.005	0.05	136.149
LC	0.05	0.02	0.01	0.01	0.02	0.2	0.01	0.1	NA
Temporada de lluvias									
ARC-L	0.08	0.03	0.18	4.32	0.37	0.1	0.54	0.6	102.033
ARC-R	0.07	0.01	0.13	0.39	0.26	0.1	0.02	0.05	203.887
PED-1	0.025	0.08	0.04	4.07	0.21	0.1	0.1	0.05	161.735
PED-2	0.07	0.08	0.03	2.86	0.18	0.1	0.08	0.05	128.892
PED-3	0.05	0.07	0.03	2.99	0.18	0.1	0.08	0.05	132.083
PED-4	0.06	0.07	0.04	4.09	0.24	0.1	0.11	0.05	168.187
PED-5	0.08	0.06	0.05	4.11	0.25	0.1	0.16	0.05	178.846
MOL	0.05	0.09	0.06	4.01	0.21	0.1	0.08	0.05	187.564
ARC-C1	0.09	0.05	0.08	4.08	0.26	0.1	0.13	0.05	233.672
ARC-C2	0.28	0.06	0.08	4.17	0.25	0.1	0.13	0.05	195.645
ARC-C3	0.07	0.06	0.07	4.17	0.26	0.1	0.13	0.05	193.654
ARC-C4	0.65	0.08	0.11	4.3	0.29	0.321	0.16	0.05	205.979
RAS	0.25	0.06	0.17	4.27	0.3	0.1	0.15	0.05	198.26
CRIP-C	0.06	0.08	0.14	4.12	0.27	0.1	0.14	0.21	180.567
CRIP-M	0.06	0.08	0.13	4.05	0.24	0.1	0.08	0.12	197.628
JER-B	0.1	0.18	0.1	3.93	0.24	0.1	0.11	0.05	150.366
JER-H	0.05	0.18	0.09	4	0.23	0.1	0.07	0.05	153.457
CAR	0.45	0.01	0.08	0.005	0.34	0.1	0.005	0.11	133.319
LC	0.05	0.02	0.01	0.01	0.02	0.2	0.01	0.1	NA

Sumado a ello, el manantial ARC-L en ambas temporadas, supera el límite establecido en la NOM-127-SSA1-2021 para el Manganeseo (Mn), mismo que tiene un valor límite de 0.15 mg/L (Fig. 28d).

La Organización Mundial de la Salud establece valor recomendable para el uso y consumo humano de concentraciones del elemento Boro de 2.4 mg/L, mismo que es superado por la mayoría de las manifestaciones termales de la zona, a excepción del manantial CAR y ARC-R (Fig. 28e). Adicionalmente, la NOM-127-SSA1-2021 menciona que valores por arriba de los 1,000 mg/L de sólidos totales disueltos, son tóxicos para la salud, mismos que son superados por los manantiales termales, salvo el río (ARC-L).

Figura 28. Histogramas de las comparaciones estacionales de los elementos traza medidos: a) Aluminio (Al), b) Arsénico (As), c) Hierro (Fe), d) Manganeseo (Mn), e) Boro (B), f) Bario (Ba).

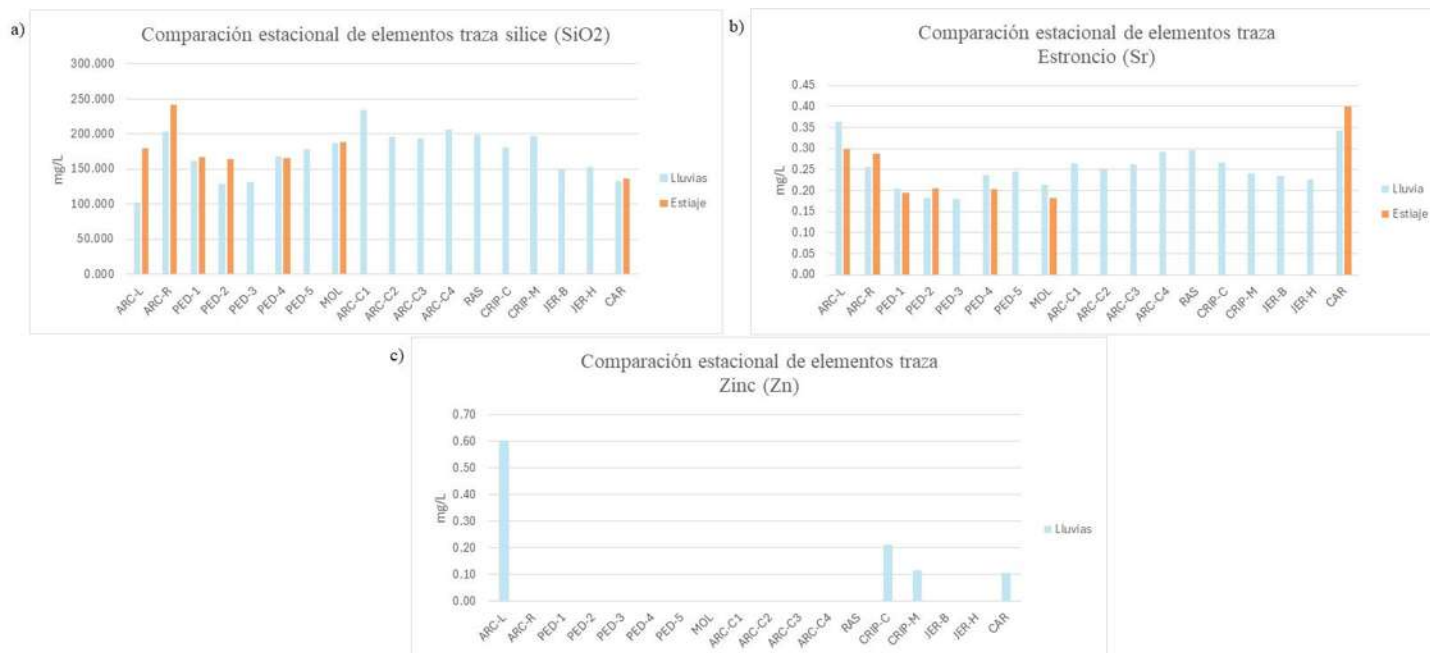


Aunque el Bario es un elemento medido por la OMS y la NOM-127, el valor del límite permisible y recomendado en agua potable (1.3 mg/L) no se excedió en ninguna de las estaciones de muestreo en ambas temporadas (Fig. 28f).

En el caso de los elementos que no cuentan con límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 y la OMS (2011), estos presentaron comportamientos diferenciados entre los manantiales.

Las concentraciones de la sílice (SiO_2) mostraron poca variación estacional; no obstante, en el río (ARC-R) se observaron valores altos durante el estiaje (250 mg/L), seguidos por el manantial ARC-C1 durante las lluvias (Fig. 29a). Las concentraciones de Estroncio (Sr) fueron relativamente bajas y constantes en la mayoría de los manantiales; sin embargo, el manantial CAR registró valores notablemente altos durante el estiaje, alcanzando los 0.400 mg/L (Fig. 29b). Por otro lado, el Zinc (Zn) fue medido únicamente durante la temporada de lluvias, presentando concentraciones bajas en general, aunque se observa una mayor abundancia en el manantial ARC-L, con un valor cercano a los 0.600 mg/L (Fig. 29c).

Figura 29. Histogramas de elementos traza sin límite permisible y recomendado para aguas portables por la OMS (2011) y NOM-127-SSA1-2021.



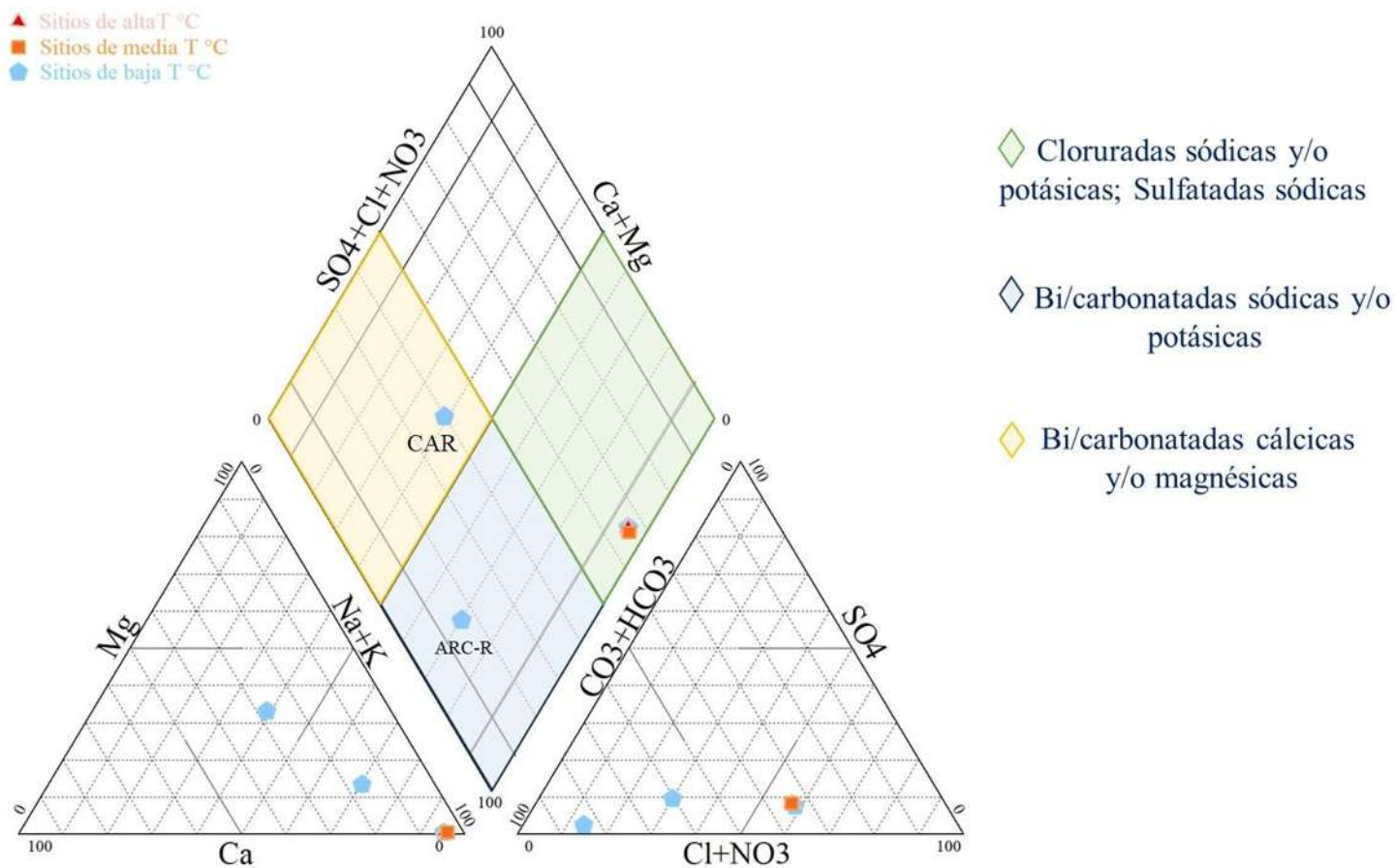
3.6 Hidrogeoquímica

Con el propósito de determinar las facies hidrogeoquímicas y evaluar la composición iónica dominante de los manantiales, se emplearon los diagramas de Piper y Stiff para ambas temporadas de muestreo.

3.6.1 Diagramas de Piper

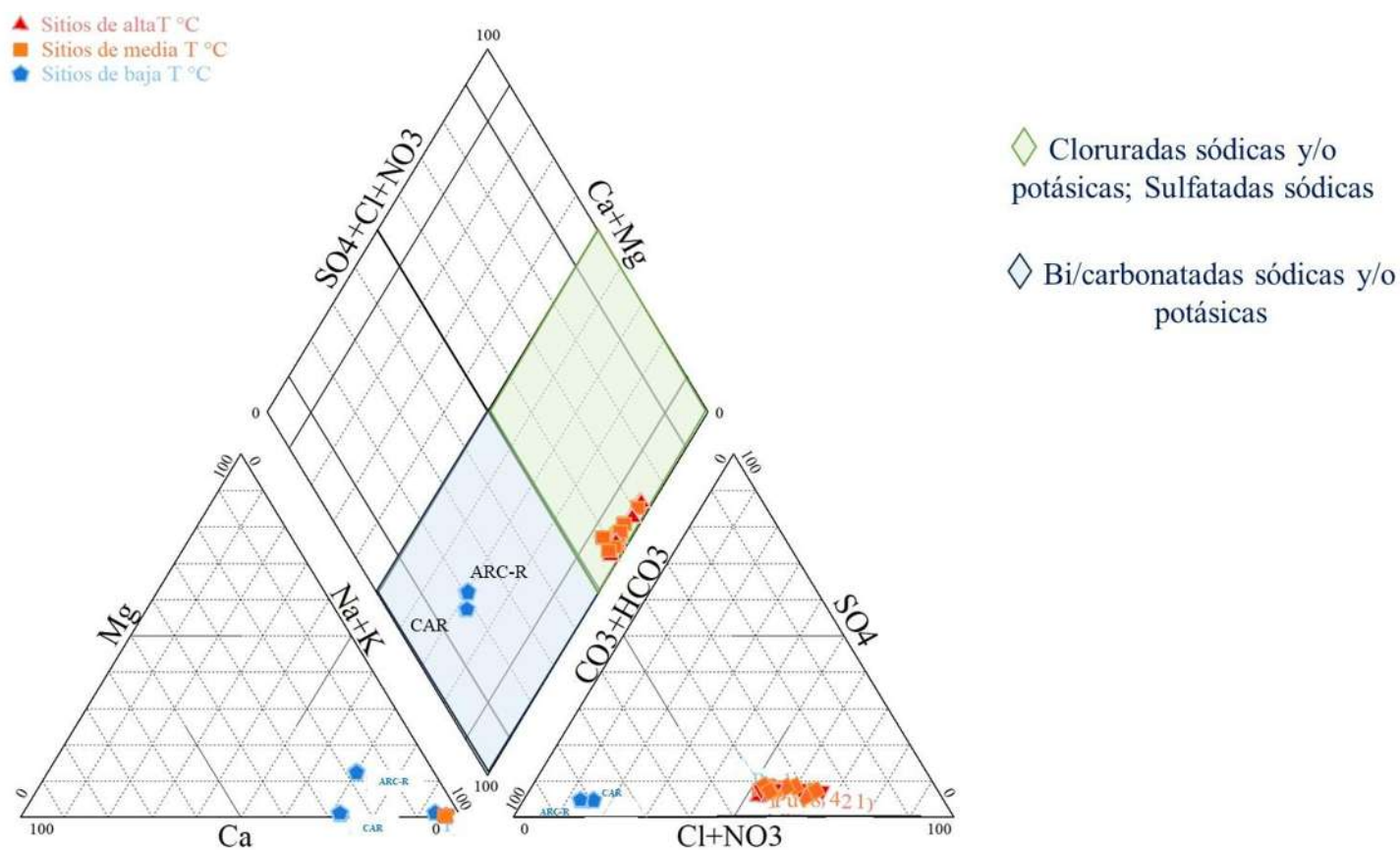
En el diagrama de Piper correspondiente al periodo seco, se identificaron tres facies hidrogeoquímicas predominantes (Fig. 30). La facie clorurada sódica y/o potásica se localiza en el extremo derecho del rombo central. La facie bicarbonatada sódica y/o potásica se localiza en la parte inferior del diagrama, representada principalmente por el sitio ARC-R (río). Finalmente, la facie bicarbonatada cálcica y/o magnésica; se ubica en el diamante izquierdo del diagrama correspondiente al sitio CAR (Sector Norte).

La distribución de estas facies indica una marcada heterogeneidad hidrogeoquímica entre los manantiales termales, el río y el manantial Carano, con predominio de aguas sódicas y de facies bicarbonatadas registradas únicamente en ARC-R y CAR durante esta temporada.

Figura 30. Diagrama de Piper correspondiente al mes de abril.

Durante la temporada de lluvias se observó un ligero cambio en la distribución de las facies hidrogeoquímicas (Fig. 31). Se mantuvo la presencia dominante de la facie clorurada sódica y/o potásica, en contraste con estiaje, se presentó una sola facie bicarbonatada sódica y/o potásica representada por los sitios ARC-R y CAR, evidenciando una modificación en la composición hidrogeoquímica de Carano durante este periodo.

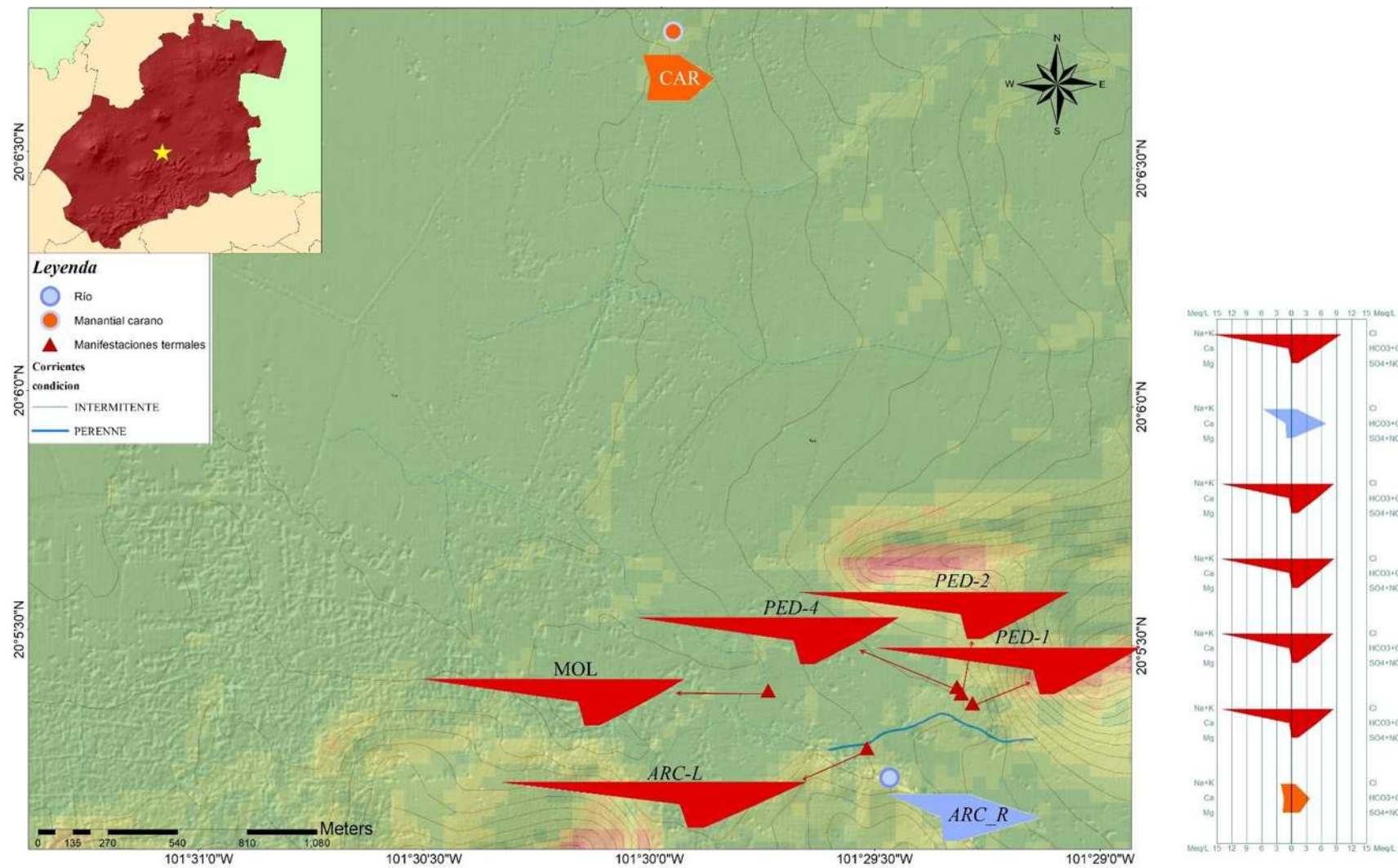
Figura 31. Diagrama de Piper correspondiente al mes de octubre.



3.6.2 Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff en estiaje (Fig. 32) y en lluvias (Fig. 33) evidencian un predominio de la composición Na-Cl en los manantiales termales, explicado por las grandes longitudes orientadas hacia esos campos. Asimismo, la composición del manantial Carano presentó un cambio en su geometría, posiblemente asociado a la recarga hídrica. También es conveniente mencionar la poca diferencia que hay entre la temporada de lluvias y estiaje para el manantial ACR-L.

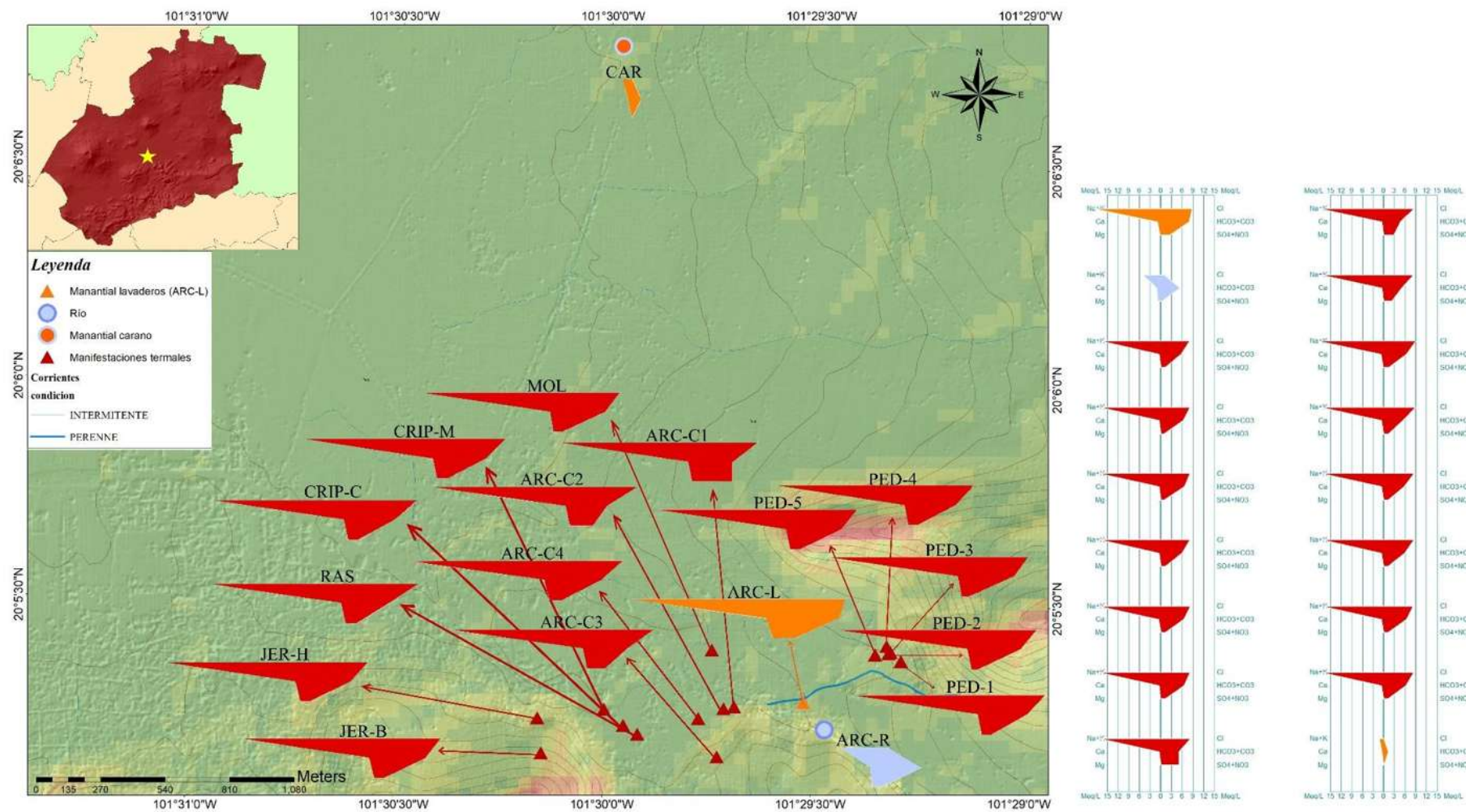
Figura 32. Distribución espacial de los diagramas de Stiff. Se muestra la composición hidrogeoquímica de los sitios muestreados durante la temporada de estiaje de la Cabecera Municipal de Puruándiro, Michoacán.



Elaboró: Oscar Champo

Enero 2026

Figura 33. Distribución espacial de los diagramas de Stiff. Se muestra la composición hidrogeoquímica de los sitios muestreados durante la temporada de lluvias de la Cabecera Municipal de Puruándiro, Michoacán.



Elaboró: Oscar Champo

Enero 2026

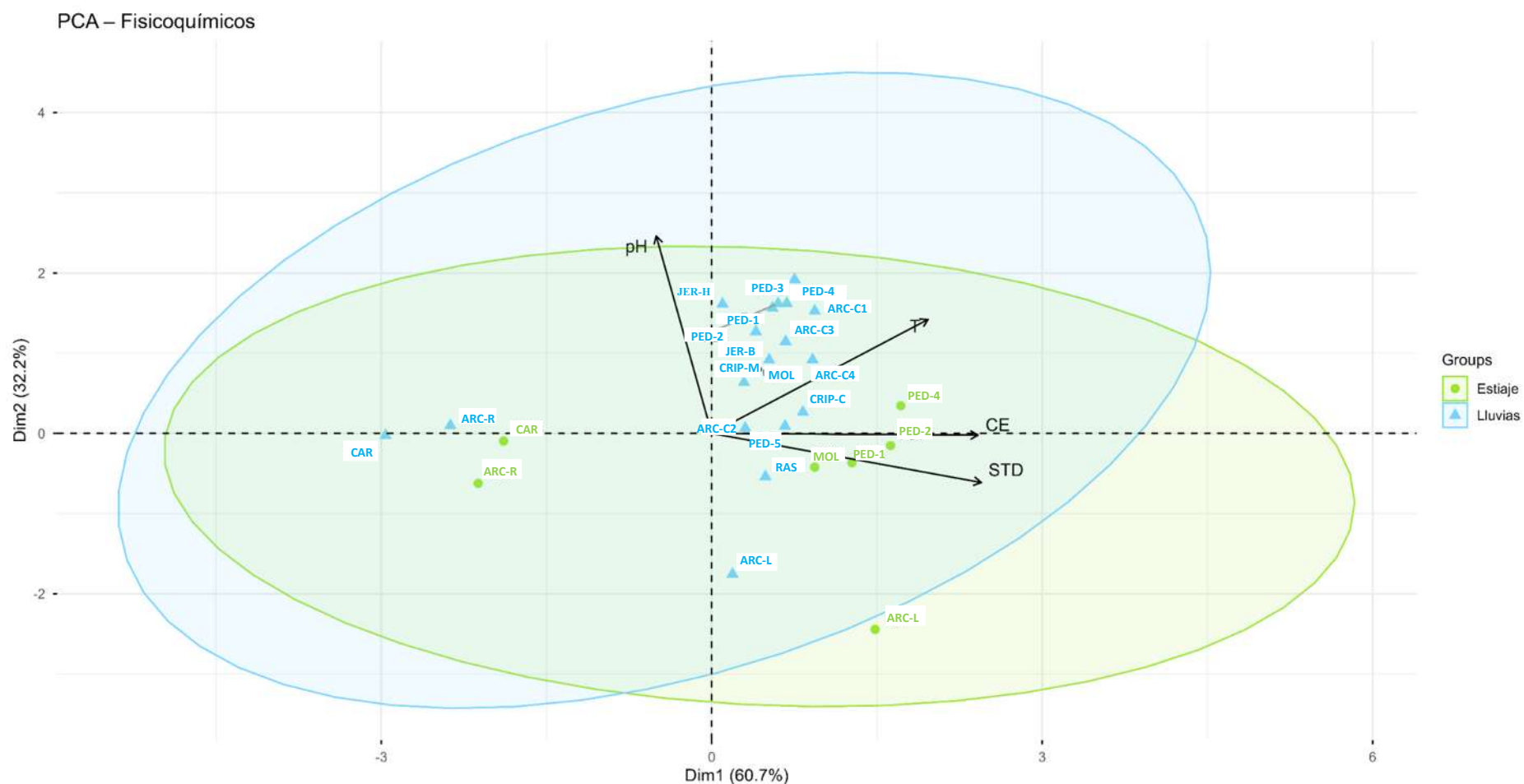
3.7 Análisis multivariados

Con el propósito de identificar los principales gradientes fisicoquímicos y las relaciones entre las variables analizadas, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) a los parámetros fisicoquímicos, aniones, cationes y elementos traza medidos en los manantiales termales durante ambas temporadas de muestreo.

En análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos, *Figura 34*, mostró que la dimensión 1 (Dim1), representa el eje vertical, mismo que explica el 60.7% de la varianza, constituyendo el principal gradiente fisicoquímico del sistema, mientras que la dimensión 2 (Dim2), representa el eje horizontal y explica el 32.2% del 92.9% de la varianza total de todo el sistema.

Dim2 está dominado principalmente por pH, con una contribución secundaria de la temperatura, mientras que Dim1, se encuentra asociado a cierto grado de mineralización del agua por la presencia de los STD y CE. En cambio, ARC-R y CAR, al ser proyectados en sentido contrario al primer gradiente, señalan una menor asociación con los STD y CE. Los manantiales muestreados durante la temporada de lluvias se distribuyen cercanos al eje Dim2, sugiriendo valores intermedios de pH. El traslape de ambas elipses correspondientes a una temporada indican que la estacionalidad no influye en la fisicoquímica de los manantiales.

Figura 34. Análisis de Componentes Principales (PCA) de la fisicoquímica de los manantiales en ambas temporadas.

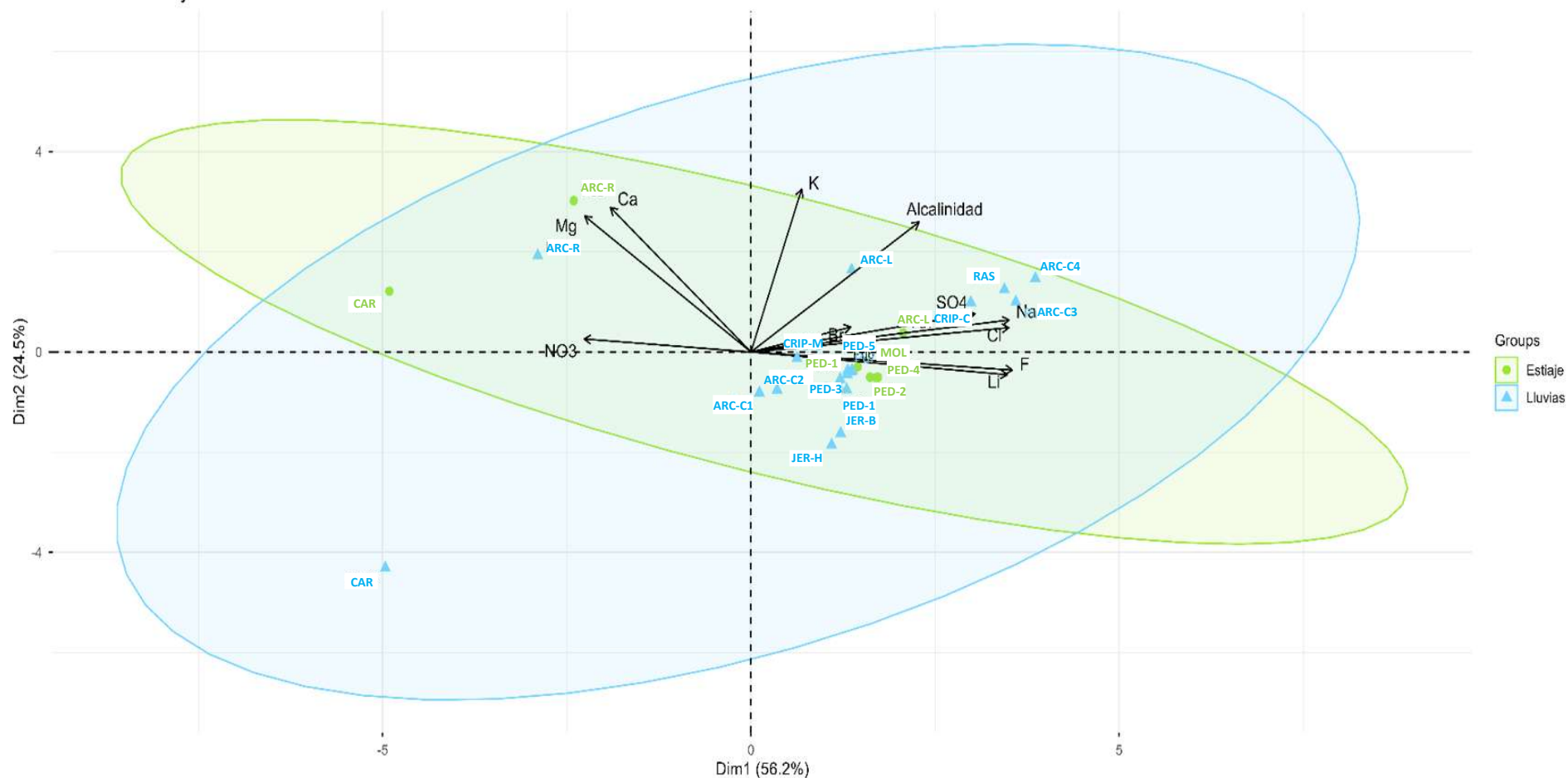


El análisis de componentes principales (PCA) de aniones y cationes, *Figura 35*, explica el 80.7% de la variabilidad total, donde Dim1 representó el 56.2% de la varianza y está asociado a las concentraciones de Li^+ , F^- , Cl^- y SO_4^{2-} con dos nubes de puntos ligadas a las manifestaciones termales,

una cercana a los componentes de Li^+ y F^- , y la otra a SO_4^{2-} , Cl^- y Na^+ . Asimismo, NO_3^- presentó una carga negativa, señalando un comportamiento opuesto al sistema termal. Aunado a esto, Dim2 representa el 24.5% de la varianza, asociada a K^+ . Se observa la cercanía del manantial ARC-R a Mg^{2+} , mostrando una afinidad por este catión. Del mismo modo que el PCA de los fisicoquímicos, la temporalidad no influye en las manifestaciones termales.

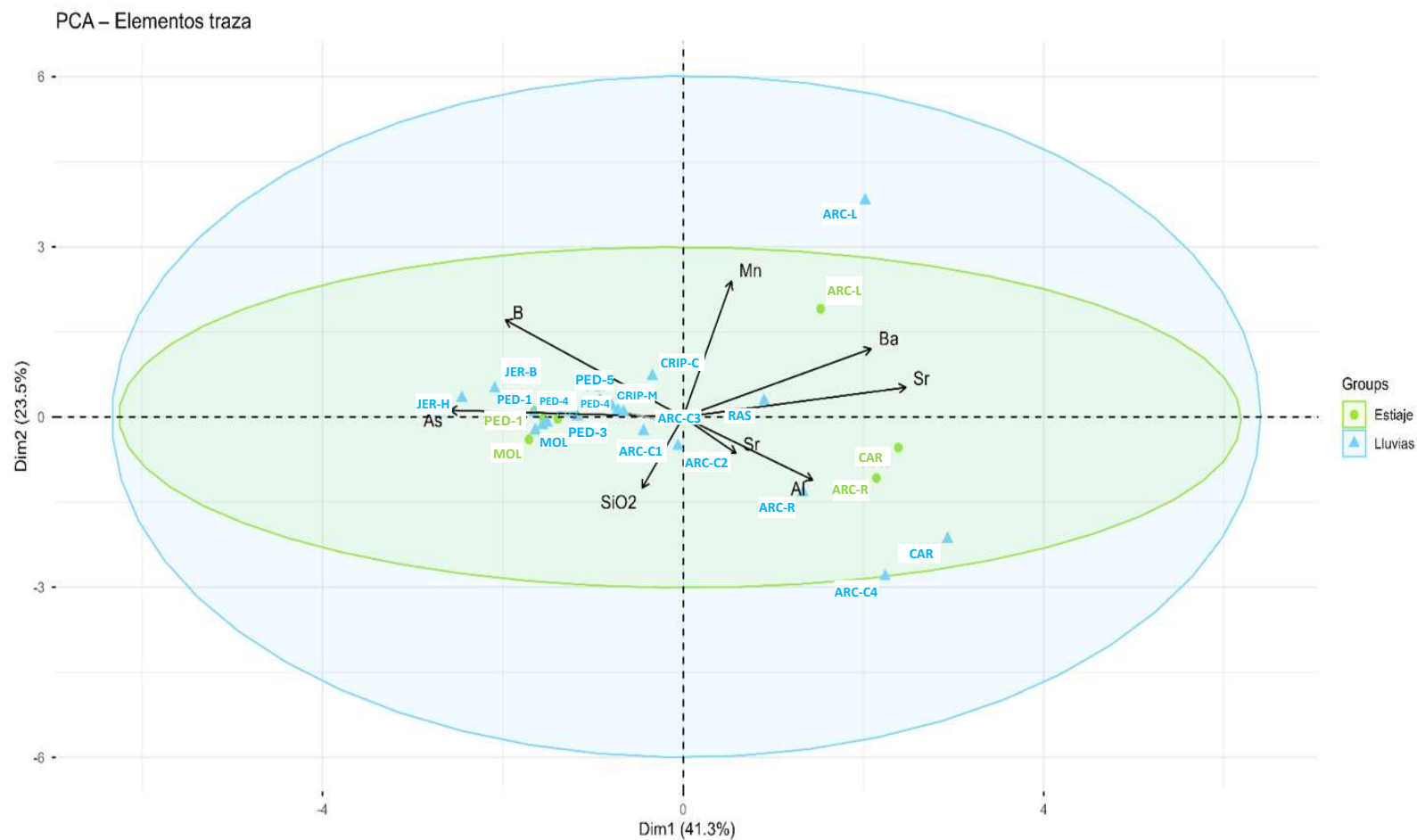
Figura 35. Análisis de Componentes Principales (PCA) de aniones y cationes de los manantiales en ambas temporadas.

PCA – Aniones y cationes



El PCA de los elementos traza, *Figura 36*, explica el 64.8% de la varianza total, con Dim1 representando el 41.3% y Dim2 el 23.5%. Dim1 está dominado positivamente por Ba, Sr y Al, mientras que As y B presentaron cargas negativas. Dim2 está asociada a Mn, con una contribución secundaria de B, y en sentido contrario el Sílice. La mayoría de los manantiales se agrupan en Dim1 del lado negativo; sin embargo, se puede observar que ACR-R está asociado a concentraciones de A

Figura 36. *Análisis de Componentes Principales (PCA) de elementos traza de los manantiales en ambas temporadas.*



3.8 Diatomeas

En el conjunto de muestras analizadas correspondientes a los 16 manantiales termales, el río y el manantial Carano, se registró una riqueza total de 94 taxones, agrupados en 33 géneros. Cabe mencionar que no en todos los casos se pudo llegar a género.

3.9 Clasificación ecológica de las especies

Con el objetivo de excluir aquellas especies con baja o nula representatividad dentro de la comunidad diatomológica, se aplicó un filtrado previo de especies, que consistió en la clasificación de las diatomeas en categorías ecológicas (dominantes, subdominantes y acompañantes), considerando de manera conjunta la abundancia relativa y la frecuencia de aparición en los manantiales muestreados (*Tabla 7*).

Tabla 7. Criterios empleados para la clasificación ecológica de diatomeas. En los casos donde la frecuencia mostraba discordancias, se priorizó la abundancia relativa para la asignación de la categoría ecológica.

Categoría	Abundancia relativa (%)	Frecuencia (%)	Especificaciones
Dominantes	> 10%	> 50%	Abundancia alta y frecuente
Subdominantes	1% - 10%	20% - 70%	Abundancia media y frecuencia moderada
Acompañantes	1%	10% - 40%	Baja abundancia, pero con cierta presencia importante
Raras	< 1%	< 10%	Muy escasas

Las especies que presentaron valores inferiores al 1% de abundancia relativa (una o seis valvas), y una frecuencia menor al 10% (presencia en al menos un manantial), fueron excluidas del análisis. En este contexto, se identificaron 44 especies durante la temporada de estiaje y 34 durante la temporada de lluvias (*Tabla 8*). Las especies que fueron descartadas para el estudio se trataron con cuidado, procurando que su exclusión no afectara de manera significativa al porcentaje total de la abundancia de la comunidad.

La baja representatividad de las especies categorizadas como *raras* sugiere que, corresponden a taxones con tolerancia ecológica restringida, cuya presencia en números reducidos no refleja patrones de variabilidad florística ni de las condiciones ambientales dominantes.

A partir de este filtro, se identificaron como especies dominantes en ambas temporadas *Achnanthidium aff. minutissimum*, *Achnanthes exigua* (*Achnanthidium exiguum*), *Denticula thermaloides* y *Gomphonema sp.* En la temporada de estiaje, las especies subdominantes incluyeron *Anomoeoneis sphaerophora*, *Cocconeis placentula*, *Craticula accomoda*, *Navicula cryptotenella*, *Nitzschia fonticola*, *Nitzschia communis*, *Nitzschia aff. perminuta*, *Nitzschia vitrea var. salinarum*, *Tryblionella granulata*, *Rhopalodia acuminata* y por último *Rhopalodia gibberula*.

Tabla 8. Diatomeas frecuentes en los manantiales termales, río y manantial Carano de la Cabecera Municipal de Puruándiro.

Especie	Clave de sitio																	
	ARC-L	ARC-R	PED-1	PED-2	PED-3	PED-4	PED-5	MOL	ARC-C1	ARC-C2	ARC-C3	ARC-C4	RAS	CRIP-C	CRIP-M	JER-B	JER-H	CAR
Temporada estiaje																		
<i>Achnanthes exigua</i>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Achnanthidium aff. minutissimum</i>	●	●	●	●	●		●	●	●	●			●	●	●	●	●	●
<i>Achnanthidium aff. lanceolata</i>		●	●				●		●	●	●						●	
<i>Aneumastus aff. minor</i>									●		●				●		●	
<i>Anomoeoneis sphaerophora</i>			●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
<i>Caloneis bacillum</i>			●				●										●	
<i>Cocconeis placentula</i>		●	●				●		●		●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Cosmioneis aff. brasiliانا</i>							●								●			
<i>Craticula accomoda</i>			●	●		●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	
<i>Denticula thermaloides</i>	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Diploneis elliptica</i>	●	●	●				●		●		●	●		●	●			●
<i>Ephitemia aff. argus</i>		●	●						●		●				●			
<i>Fragilaria construens</i>				●		●	●	●			●							
<i>Gomphonema sp.</i>	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Halamphora aff. veneta</i>	●	●		●			●	●	●					●	●	●	●	
<i>Hantzschia amphioxys</i>							●	●	●		●						●	
<i>Luticola mutica</i>				●			●	●	●		●	●	●	●		●		●
<i>Mastogloia smithii</i>			●				●		●						●			
<i>Navicula aff. veneta</i>	●	●						●	●		●							
<i>Navicula angusta</i>		●									●							●
<i>Navicula cryptotenella</i>		●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Navicula cuspidata</i>			●	●			●				●							
<i>Navicula erifuga</i>			●					●			●	●		●			●	●
<i>Navicula halophilioides</i>	●	●	●	●	●				●					●	●			
<i>Navicula tellenoides</i>			●				●		●									
<i>Nitzschia aff. perminuta</i>		●		●	●		●	●			●	●	●		●	●	●	●
<i>Nitzschia aff. palea</i>	●	●						●	●		●	●						

*Continuación de la Tabla 8 de frecuencia de diatomeas registradas en los manantiales termales, río y manantial Carano**

[illegible]

*Continuación de la Tabla 8 de frecuencia de diatomeas registradas en los manantiales termales, río y manantial Carano**

[illegible]

Adicionalmente, en el manantial Carano (CAR) se observó la presencia de tres especies clasificadas como “raras, pero localmente abundantes”: *Amphora pediculus*, *Psammothidium sacculus* y *Rhoicosphenia abbreviata*, debido a que presentaron valores cercanos al 1% de abundancia relativa, sugiriendo una buena asociación con las condiciones ambientales del lugar.

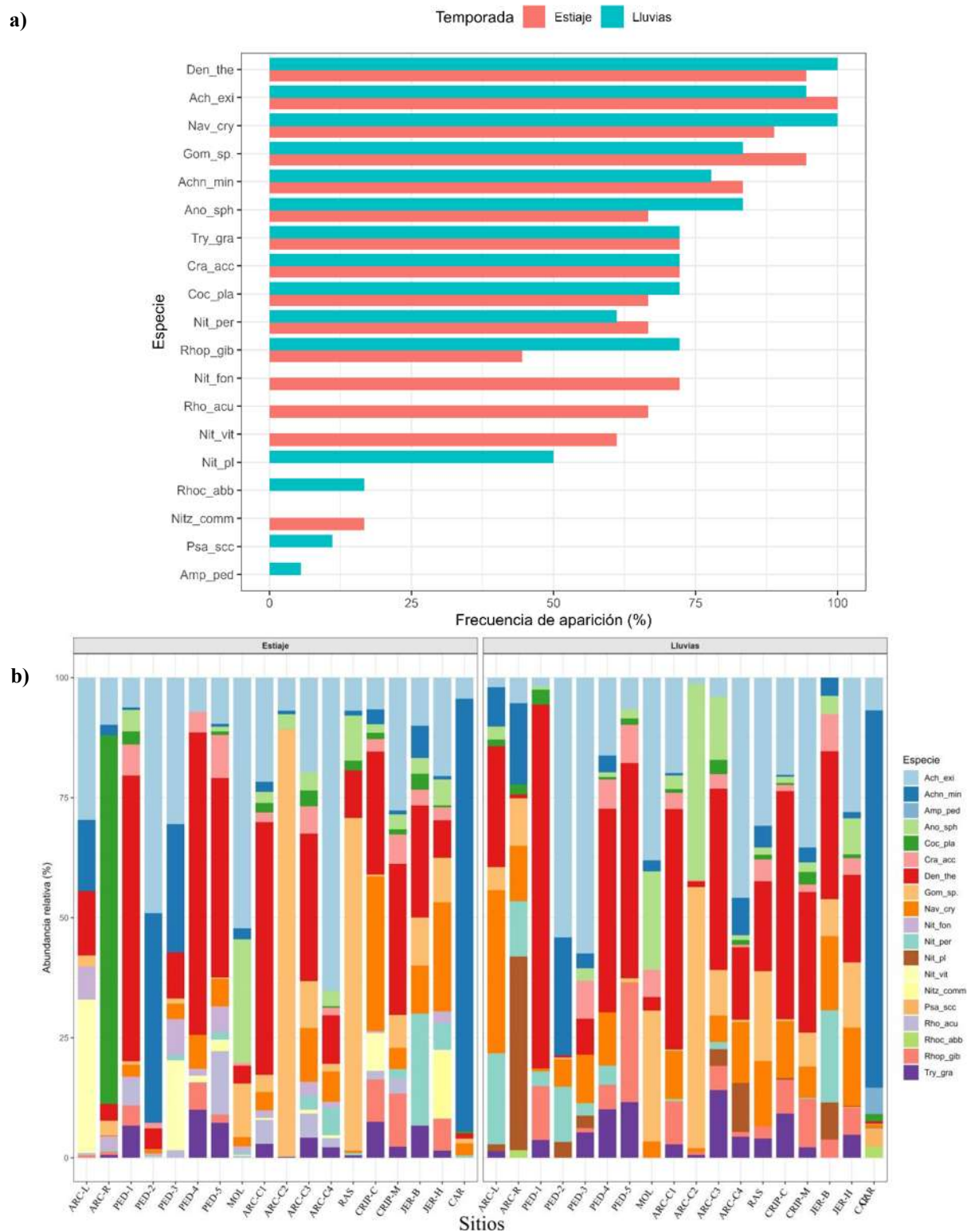
Con la finalidad de evaluar la distribución y estructura de la comunidad de diatomeas dominantes y subdominantes, se analizaron patrones de abundancia relativa y frecuencia de aparición. Para ello, se elaboraron histogramas que permitió visualizar la contribución porcentual de cada taxón, así como su presencia en los manantiales muestreados, diferenciando entre las temporadas de estiaje y lluvias (Fig. 37). Para facilitar la lectura de los gráficos subsecuentes, se elaboró una tabla de abreviaturas taxonómicas (Tabla 9).

Tabla 9. Abreviaciones de las especies dominantes y subdominantes para su mejor visualización y asociación en los gráficos.

Taxon	Abreviación
<i>Achnanthes exigua</i>	<i>Ach_exi</i>
<i>Achnanthidium aff. minutissimum</i>	<i>Achn_min</i>
<i>Amphora pediculus</i>	<i>Amp_ped</i>
<i>Anomoeoneis sphaerophora</i>	<i>Ano_sph</i>
<i>Cocconeis placentula</i>	<i>Coc_pla</i>
<i>Craticula accomoda</i>	<i>Cra_acc</i>
<i>Denticula thermaloides</i>	<i>Den_the</i>
<i>Gomphonema sp.</i>	<i>Gom_sp</i>
<i>Navicula cryptotenella</i>	<i>Nav_cry</i>
<i>Nitzschia aff. palea</i>	<i>Nit_pl</i>
<i>Nitzschia aff. perminuta</i>	<i>Nit_per</i>
<i>Nitzschia aff. fonticula</i>	<i>Nit_fon</i>
<i>Nitzschia communis</i>	<i>Nit_comm</i>
<i>Nitzschia vitrea var. salinarum</i>	<i>Nit_vit</i>
<i>Psammothidium sacculus</i>	<i>Psa_scc</i>
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	<i>Rhoc_abb</i>
<i>Rhopalodia acuminata</i>	<i>Rho_acu</i>
<i>Rhopalodia gibberula</i>	<i>Rhop_gib</i>
<i>Tryblionella granulata</i>	<i>Try_gra</i>

En la Figura 37a, se puede observar la presencia de la especie *A. exigua* en el 100% de los sitios muestreados en estiaje, acompañada de *D. thermaloides* y *N. cryptotenella* en lluvias. Asimismo, en la Figura 37b, la comunidad diatomológica se encuentra ligeramente distribuida, resaltando, nuevamente, la abundancia de *A. exigua* y *D. thermaloides* en los manantiales termales, así como, la dominancia local de especies como *C. placentula*, *Gomphonema sp.* y *A. minutissimum*, evidenciando una posible asociación o preferencia a algún elemento químico presente en el sitio. La abundancia del género *Nitzschia* es baja, pero se encuentra en la mayoría de los sitios muestreados de los sectores Noreste, Centro y Oeste, relacionados a actividades recreativas de balneología, pastoreo y aseo personal, en específico la presencia de colores cafés relacionados a la afinidad de *Nitzschia aff. palea* en la época de lluvias.

Figura 37. Representación gráfica de: (a) la frecuencia de aparición y (b) abundancia relativa de las especies dominantes y subdominantes durante las temporadas correspondientes a las temporadas de estiaje y lluvias.



3.10 Listado taxonómico

El presente listado taxonómico integra las especies de diatomeas (Bacillariophyta) encontradas en los manantiales termales de Puruándiro, las cuales, a partir de sus características morfológicas observadas y medidas, como el ancho, largo de la valva y conteo de estrías al microscopio óptico, fueron identificadas en base a criterios taxonómicos ya establecidos. Las especies se organizaron jerárquicamente desde la división hasta el nivel de especie.

* dominante, ** subdominante, ~ rara, pero localmente abundante

Bacillariophyta

Clase *Bacillariophyceae* Haeckel 1878

Orden *Achnanthes* Silva 1962

Familia *Achnanthes* Mann 1990

Genero *Achnanthes* Kützinger 1844

Achnanthes exigua (Grunow) Czarnecki 1994*

(?) *Achnanthes exigua* var. *constricta* (Torka) Husted 1921; (?) *Achnanthes exigua* var. *heterovalva* Grunow 1923; *Achnanthes exigua* Grunow 1880

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1999) Lámina 23: 1-19

Valvas variables en tamaño, elípticas en su mayoría a lineal-elípticas-lineares. Raramente cóncavas en el centro con polos rombo-elípticos, elípticos. El área axial es estrecha-lineal a estrecha acompañada de un área central en forma de vendaje transversal que se extiende desde los bordes, en algunos casos unilateral y ligeramente pronunciada en el lado opuesto. Longitud de 5-17 (20) μm , ancho de 4-8(10) μm y estrías que van de débil a radiales de 24 sobre 30 en 10 μm .

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1999)

Achnanthes aff. minutissima (Kützinger) Czarnecki 1994*

Achnanthes microcephala Kützinger 1844 (Lectotypus); *Achnanthes lineare* W. Smith 1855 (Lectotypus); *Achnanthes minutissima* var. *cryptocephala* Grunow in Van Heurck 1880; *Achnanthes minutissima* Kützinger 1833

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1999) Lámina 32: 10-30

Valvas elípticas, lineoelípticas a lineolanceoladas con ápices redondeados a subcapitados. Sus estrías son transapicales ligeramente radiales. El área axial es angosta cuando el rafe está presente, cuando no está presente, el esternón se amplía en la parte central. Longitud: 5 a 25 μm , ancho 2.5-4 μm y estriación débil, moderada e incluso más radial en las partes distales, en promedio 30 en 10 μm .

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1999)

Genero *Planothidium* Round & Bukhtiyarova 1996

Planothidium aff. lanceolatum (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot 1999

Sin. *Achnanthes lanceolata ssp. frequentissima* Lange-Bertalot 1991

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1999) Lamina 44: 4-13

Distribución: probablemente cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1999)

Genero *Psammothidium* Bukhtiyarova & Round 1996

Psammothidium aff. sacculus (J. R. Carter) Bukhtiyarova 1996~

Sin. *Achnanthes saccula* Carter in Carter & Bailey-Watts 1981

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1999) Lamina 15: 19-28 y Spaulding et al., (2021)

Las valvas son elípticas a linear-elíptica. El rafe presenta un área axial estrecha y una zona central dispuesta transversalmente en forma rectangular, bordeadas por algunas estrías de diversas longitudes. Rafe recto y polos proximales simples y ligeramente expandidos. La valva sin rafe presenta una zona axial romboidal estrecha y una zona central pequeña y vista en su mayoría asimétricamente. Largo 8 - 13 μm , ancho 3.9 – 4.4 μm y estrías radiales en ambas valvas 26 – 30 en 10 μm .

Ecología: presente en aguas oligotróficas con contenido de electrolitos de bajo a medio (Krammer & Lange-Bertalot, 1999)

Familia *Cocconeidaceae* Kützing 1844**Genero** *Cocconeis* Ehrenberg 1837

Cocconeis placentula var. lineata (Ehrenberg) Van Heurck 1885**

Identificación: (Krammer & Lange-Bertalot, 1999) Lamina 52: 1-13

Valvas relativamente planas, anchas elípticas, elípticas a lineales-elípticas. La valva del rafe presenta una zona axial muy estrecha y un área central elíptica a circular. Rafes rectos, filiformes, proximales y distales delimitados por poros. Longitud: 7.5 - 98 μm , ancho 8 – 40 μm y estrías 14-23 μm o en su mayoría 20-23 μm en 10 μm , puntos 15-20 en 10 μm .

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1999)

Orden *Thalassiophysales* Mann 1990**Familia** *Catenulaceae* Mereschk. 1902**Genero** *Amphora* Ehrenberg 1844

Amphora pediculus (Kützing) Grunow 1880~

Cymbella ? *pediculus* Kützing 1844; *Amphora pediculis* var. *exilis* Grunow in Van Heurck 1844; *Amphora ovalis* var. *pediculus* (Kützing) Van Heurck 1885; *Amphora perpusilla* Grunow (1884-87) sensu Van Heurck tipo de syn.4

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 150: 8-13

Valvas anchas longitudinales con extremos anchos, semielíptica con dorsales convexos, rectos o ligeramente cóncavas, polos redondeados. El área axial es estrecha, lineal, en el área central es relativamente ancha. Longitud: 5-18 µm, ancho 2-4 µm

Distribución: Probablemente cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Orden *Cymbellales* Mann 1990

Familia *Anomoeoneidaceae* Mann 1990

Genero *Anomoeoneis* Pfitzer 1871

Anomoeoneis sphaerophora (Ehrenberg) Pfitzer 1871**

Navicula sphaerophora Ehrenberg 1843

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 92: 1-2 y Spaulding et al. (2021)

Valvas con forma lineal-elíptica, elíptica-lanceolada o rómbica-lanceolada con ápices subrostrados a capitados. El área axial es estrecha y bordeada a cada lado por una fila de areolas, en el caso de la especie mostrada en los manantiales no cuenta con la presencia de las filas de areolas. En el área central es asimétrica y liriforme, de un lado de la valva y ampliamente redondeado en el lado opuesto. Longitud 25-200 µm, ancho 12-60 µm con estrías radiales volviendo paralelas o ligeramente convergentes en los ápices 16 a 18 en 10 µm.

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Familia *Gomphonemataceae* Kützing 1844

Genero *Gomphonema* Ehrenberg 1832

Gomphonema sp. *

Se observó una morfología similar a las especies pertenecientes al género *Gomphonema*. La cabeza de la valva es más ancha que el polo opuesto, que presenta un gran ensanchamiento en esta parte. Las ramas del rafe se extienden hasta el nodo central y en los polos presenta hendiduras terminales que giran a un lado. Muy parecida *Gomphonema gracile* vista en Krammer & Lange-Bertalot (1986) Figura 154: 26-27 diferenciándola de la especie del presente estudio por la presencia de más de un nódulo central que es característico de este género. La especie presentó longitudes 19.98 – 46.05 µm, ancho 6.76 – 9.98 µm y estrías 10 – 14 en 10 µm.

Familia *Rhoicospheniaceae* Chen & Zhu 1983

Genero *Rhoicosphenia* Grunow 1860

Rhoicosphenia abbreviata (C. Agardh) Lange-Bertalot 1980~

Gomphonema abbreviatum C. Agardh 1831 non sensu Kützing 1844 nec. al.; *Gomphonema curvatum* Kützing 1833; *Rhoicosphenia curvata* (Kützing) Grunow ex Rabenhorst 1864

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 91: 20-28

Valvas ligeramente curvadas en vista valvar y polos redondeados, con un ensanchamiento ascendente desde el polo inferior al superior, en ambos extremos de la valva se forman pseudoseptos, siendo el lado cóncavo el más desarrollado. Valva ventral cóncava, con sistema de rafe desarrollado. La valva dorsal es convexa, con hendiduras cortas en el rafe en los extremos polares. El área axial es estrecha Longitud: 10 - 75 μm , ancho: 3-8 μm y estrías uniseriadas 15 – 20 en 10 μm

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Orden *Fragilariales* Silva 1962

Familia *Fragilariaceae* Kützing 1844

Genero *Fragilaria* Lyngbye 1819

Fragilaria sp.

Orden *Naviculales* Bessey 1907

Familia *Amphipleuraceae* Grunow 1862

Genero *Halamphora* (Cleve) Levkov 2009

Halamphora aff. *veneta* (Kützing) Levkov 2009

Amphora veneta Kützing 1844

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 151: 7-17

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Familia *Cosmioneidaceae* Mann 1990

Genero *Cosmioneis* Mann & Stickle 1990

Cosmioneis aff. *brasiliiana* (Cleve) C. E. Wetzel & Ector 2017

Cymbella brasiliana Cleve 1881; *Navicula brasiliana* (Cleve) Cleve 1894

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 52: 1, 2

Familia *Diadesmidaceae* Mann 1990

Genero *Luticola* Mann 1990

Luticola mutica (Kützing) Mann 1990

Navicula mutica Kützing 1844

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 61: 1-8

Familia *Diploneidaceae* Mann 1990

Genero *Diploneis* Ehrenberg 1844

Diploneis elliptica (Kützing) Cleve 1894

Navicula elliptica Kützing 1844

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 108: 1-6

Familia *Naviculaceae* Kützing 1844

Genero *Caloneis* Cleve 1894

Caloneis bacillum (Grunow) Cleve 1894

Stauroneis bacillum Grunow 1860; *Navicula fasciata* Lagerstedt 1873; *Caloneis fasciata* (Lagerstedt) Cleve 1894; *Caloneis bacillaris* (Gregory 1856) Cleve 1894

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 173: 9-20

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Genero *Navicula* Bory 1822

Navicula aff. halophiloides Hustedt 1959

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 45: 21-23

Navicula aff. veneta Kützing 1844

Navicula cryptocephala var. *veneta* (Kützinger) Rabenhorst 1864; *Navicula cryptocephala* var. *subsalina* Hustedt 1925

Identificado: Krammer & Lange-Bertalot (1986)

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Navicula angusta Grunow 1860

Navicula cari var. *angusta* Grunow in Van Heurck 1880; *Navicula cincta* va. *angusta* (Grunow) Cleve 1895; *Navicula cincta* var. *linearis* Østrup 1910; *Navicula pseudocari* Krasske 1939; *Navicula lobeliae* Jørgensen 1948

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 28: 1 – 5

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Navicula cryptotenella Lange-Bertalot 1985**

Navicula tenella Brébisson ex Kützinger 1849 sensu Grunow 1880; *Navicula radiosa* var. *tenella* (Brébisson ex Kützinger) Van Heurck 1885

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 33: 9 – 11

Valvas lanceoladas, con extremos puntiagudos. Rafe filiforme. Área axial linear y angosta. Área central angosta delimitada por estrías centrales pequeñas, radiales en el centro y convergentes en los polos. Longitud: 14 – 40 µm, ancho: 5 – 7 µm, estrías 14 – 16 en 10 µm.

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Navicula cuspidata (Kützinger) Kützinger 1844

Frustulia cuspidata Kützinger 1833; *Navicula cuspidata* var. *ambigua* (Ehrenberg 1843) Cleve 1894; *Navicula accurata* Hustedt 1950

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) Lamina 43: 1 – 8

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Navicula erifuga Lange-Bertalot 1985

Navicula leptcephala Brébisson ex Grunow in Van Heurck 1880 non Rabenhorst 1853; *Navicula cincta* var. *leptcephala* (Brébisson) Van Heurck 1885; *Navicula heuflerii* var. *leptcephala* (Brébisson) Peragallo 1897-1908; *Navicula cinctaeformis* Hustedt sensu Grunow

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986)

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Navicula tenelloides Hustedt 1937

Navicula carniollensis Hustedt 1945

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 38: 16 – 20

Familia *Pinnulariaceae* Mann 1990

Genero *Mayamaea* Lange-Bertalot 1997

Mayamaea aff. agrestis (Hustedt) Lange-Bertalot 2001

Navicula agrestis Hustedt 1937

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 74: 1 – 7

Distribución: probablemente cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Genero *Pinnularia* Ehrenberg 1843

Pinnularia appendiculata (C. Agardh) Schaarschmidt 1881

Frustulia appendiculata Agardh 1827; *Navicula naveana* Grunow 1863; *Navicula appendiculata* var. *irrorata* Grunow 1880; *Pinnularia silvatica* Petersen 1935; *Pinnularia irrorata* (Grunow) Hustedt 1939.

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 193: 19 – 29

Distribución: Cosmopolita en lugares ericos, en pantanos, manantiales y en el litoral (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Pinnularia subrostrata (A. Cleve) A. Cleve 1955

Pinnularia divergentissima var. *subrostrata* A. Cleve 1895

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 185: 11 – 19

Familia *Sellaphoraceae* Mereschkowsky 1902

Genero *Sellaphora* Mereschkowsky 1902

Sellaphora aff. capitata D. G. Mann & S. M. McDonald 2004

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 42: 1 – 11

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Familia *Stauroneidaceae* Mann 1990

Genero *Craticula* Grunow 1867

Craticula accomoda (Hustedt) D. G. Mann 1990**

Navicula minusculoides Hustedt 1942; *Navicula molesta* var. *subdiversa* Messikommer 1960;
Navicula accomoda Hustedt 1950

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 45: 13 – 20

Valvas lineares lanceoladas, con ápices rostrados a subcapitados y redondeados. Área axial estrecha y área central ligeramente expandida. Estrías radiadas débilmente al centro haciéndose paralelas y convergen cerca de los ápices.

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Orden *Mastogloiales* Mann 1990

Familia *Mastogloiaceae* Mereschk 1903

Genero *Aneumastus* Mann & Stickle 1990

Aneumastus aff. minor Lange-Bertalot 1993

Navicula tuscula f. minor Hustedt 1930; *Anuemastus tusculus f. minor* N. A. Andresen, Stoermer & r. g. kreis, Jr., nom. inval. 2000

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 81: 1 – 8 y Spaulding et al. (2021)

Genero *Mastogloia* Thwaites ex W. Smith 1856

Mastogloia smithii Thwaites ex W. Smith 1856

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1986) lamina 201: 1 – 9

Distribución: Cosmopolita en aguas salobres (Krammer & Lange-Bertalot, 1986)

Orden *Bacillariales* Hendey 1937

Familia *Bacillariaceae* Ehrenberg 1831

Genero *Denticula* Kützing 1844

Denticula thermaloides B. Van de Vijver & C. Cocquyt 2009*

Identificación: Van de Vijver & Cocquyt (2009)

Valvas Lineares a lineolanceoladas con márgenes ligeramente convexos y ápices cuneiformes redondeados. Longitud 20 – 45 μm y ancho 3.5 – 6 μm . Las fíbulas están dispuestas entre costillas transápicales, 3 – 4 en 10 μm . Las estrías transápicales son paralelas, 15 – 17 en 10 μm .

Genero *Hantzschia* Grunow 1877

Hantzschia amphioxys (Ehrenberg) Grunow 1880

Eunotia amphioxys Ehrenberg 1843

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 88: 1 – 7

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997)

Genero *Nitzschia* Hassall 1845

Nitzschia aff. palea (Kützing) W. Smith 1865**

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 59: 1 – 24
Valvas lineares a lineolanceoladas, con extremos atenuados y ápices redondeados o subcapitados. Fíbulas equidistantes y visibles. Longitud: 15 – 70 μm , ancho 2.5 – 5 μm , fíbulas 9 – 17 en 10 μm estrías 28 – 40 en 10 μm .

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997)

Nitzschia aff. perminuta Grunow 1881**

Nitzschia palea var. *perminuta* Grunow in Cleve & Grunow 1880; *Nitzschia frustulum* var. *tenella* Grunow in Van Heurck 1881 non *Nitzschia tenella* Brébisson ex W. Smith; *Nitzschia (frustulum* var.) *minutula* Grunow in Van Heurck 1881; *Nitzschia hiemalis* Hustedt 1943

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 72: 1 – 23

Las valvas son lineares a lineal-lanceolada, con márgenes paralelos. La valva distal se estrecha abruptamente para formar los polos, ligeramente alargados o redondeados. Longitud: 8 – 45 μm , ancho 2.5 – 3 μm , fíbulas 10 – 16 en 10 μm y estrías 26 – 32 (36) en 10 μm .

Distribución: Probablemente cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997).

Nitzschia aff. fonticola (Grunow) Grunow 1881**

Nitzschia (palea var.?) fonticola Grunow in Cleve & Möller 1879 (Nr. 174); *Nitzschia fonticola* (Grunow) Grunow in Van Heurck 1881; *Nitzschia kuetzingiana var. romana* (Grunow) Grunow in Van Heurck 1881; (?) *Nitzschia minima* Meister 1935; *Nitzschia macedonica* Hustedt 1945; *Nitzschia subromana* Hustedt 1954; *Nitzschia manca* Hustedt 1957 pro-parte (Iconotypus); weitere (mutmaßliche) Synonyme s.u.

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 75: 1 – 22

Valvas lineo a lineolanceoladas con extremos subcapitados. Estrías visibles y fíbulas gruesas. Dependiendo de la longitud de la valva, los frústulos son más anchos a estrechos-lanzados redondeados y redondeados puntiagudos. Longitud 10 – 65 µm, ancho 2.5 – 5 µm, fíbulas 9 – 16 y estrías 23 – 33 en 10 µm

Distribución: Probablemente cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997).

Nitzschia amphibia Grunow 1862

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 78: 13 – 26

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997).

Nitzschia communis Rabenhorst 1860**

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 79: 1 – 6

Valvas lineares con extremos ampliamente redondeados con estrías muy finas y fíbulas grandes. Longitud 6 – 40 µm, ancho 4 – 5.8 µm.

Nitzschia clausii Hantzsch 1860

Nitzschia sigma var. curvula (Ehrenberg 1838) Brun 1880; *Nitzschia sigma var. clausii* (Hantzsch) Grunow 1878

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 19: 1 – 6A

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997)

Nitzschia dissipata (Kützing) Rabenhorst 1860

Synedra dissipata Kützing 1844; *Nitzschia minutissima* W. Smith 1853

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 11: 1 – 14

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997)

Nitzschia frustulum (Kützinger) Grunow 1880

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997)

Distribución: cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997)

Nitzschia vitrea var. *salinarum* Grunow 1862**

Nitzschia arcuata Gregory ex Greville 1859

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 56: 3 – 5

Frústulas lineares en vista valvas, a veces con bordes ligeramente cóncavos. Valvas lineares, casi lanceoladas; extremos cónicos, según la posición, asimétricos en forma de pico o más prominentes en la parte anterior. Largo 30 – 85 µm, ancho 5 – 9 µm, fíbulas 5 – 7 µm y estrías 25 – 30 µm.

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997)

Genero *Tryblionella* W. Smith 1853

Tryblionella granulata (Grunow) Mann 1990**

Nitzschia granulata Grunow in Cleve & Möller 1879

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 35: 9 – 13

Distribución: Cosmopolita en medios litorales de los mares (Krammer & Lange-Bertalot, 1997).

Tryblionella aff. *hungarica* (Grunow) Frenguelli 1942

(?) *Nitzschia plicatula* Hustedt 1953; (?) *Nitzschia rugosa* Hustedt 1936 non Østrup in Héribaoud et al. 1920; (?) *Nitzschia pseudohungarica* Hustedt 1939; *Nitzschia hungarica* Grunow 1862

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 34: 1 – 3

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997).

Orden *Rhopalodiales* Mann 1990

Familia *Rhopalodiaceae* (Karsten) Topachevs' kyj & Oksiyuk 1960

Genero *Epithemia* Kützinger 1844

Epithemia aff. *argus* (Ehrenberg) Kützinger 1844

(?) *Eunotia ocellata* Ehrenberg 1841; (?) *Epithemia ocellata* (Ehrenberg) Kützinger 1844; *Eunotia argus* Ehrenberg 1843; *Epithemia longicornis* (Ehrenberg 1845) W. Smith 1853; *Epithemia intermedia* Hilse 1860 non *Epithemia intermedia* Fricke 1904; *Epithemia peisonis* Pantocsek 1901

Identificado: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 102: 1 – 9

Distribución: Cosmopolita (Krammer & Lange-Bertalot, 1997)

Genero *Rhopalodia* O. Müller 1895

Rhopalodia acuminata Krammer 1987**

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 112: 7 – 10

Valvas con dorso muy convexo y el área ventral ligeramente cóncava, los polos son redondeados y puntiagudos. Las costillas que sostienen el canal del rafe son más anchas que las costillas fibulares. Las estrías finas, pero claramente punteadas. Longitud: 22 – 112 µm, ancho 7.5 – 11 µm y estrías 16 – 19 en 10 µm.

Rhopalodia brebissonii Krammer 1987

Rhopalodia musculus var. *sucinta* sensu H. & M. Peragallo 1897-1908; *Rhopalodia gibberula* var. *sucinta* sensu Fricke 1905 in A. Schmidt et al. 253: 23 – 28

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 113: 7 – 13

Rhopalodia constricta (W. Smith) Krammer 1987

Epithemia constricta W. Smith 1853 fig. 30: 248; non “Ep. constricta, cl. De Brébisson in litt. cum specim” ex W. Smith 1853; *Rhopalodia musculus* var. *constricta* (W. Smith) H. & M. Peragallo 1897 – 1908; *Rhopalodia gibberula* var. *constricta* (W. Smith) Karsten 1899

Identificación: Krammer & Lange-Bertalot (1997) lamina 113A: 1 – 6

Distribución: Cosmopolita en agua de tipo salobre (Krammer & Lange-Bertalot, 1997).

Rhopalodia gibberula (Ehrenberg) O. Müller 1895**

Eunotia gibberula Ehrenberg 1843; *Epithemia gibberula* (Ehrenberg) Kützing 1844

Identificación: (Krammer & Lange-Bertalot, 1997) lamina 112: 1 – 6

Vista lateralmente, la valva es lineal-elíptica hasta ampliamente elíptica, en el centro ligeramente estrecha. Los laterales don moderadamente a fuertemente convexos y los polos son redondeados. Longitud: 25 – 100 µm, ancho 15 – 40 µm, en la región central de la valva hay 15 – 19 estrías en 10 µm.

Orden *Surirellales* Mann 1990

Familia Surirellaceae Kützinger 1844**Genero Surirella Turpin 1827***Surirella sp.***3.11 Diversidad de la comunidad**

La diversidad florística no solo se relaciona con el número de especies presentes, sino también en la forma en que estas se distribuyen. Por ello, se emplearon índices de diversidad ecológica, los cuales integran simultáneamente riqueza específica y dominancia relativa, con la intención de describir de manera conjunta la composición de las diatomeas en los manantiales durante las temporalidades.

Tabla 7. Índices de diversidad ecológica por manantial en los dos periodos estudiados.

Clave	Taxa	Shannon (H')	Simpson (D)	Margalef	Equitatividad (J')
<i>Temporada estiaje</i>					
ARC-L	19	2.248	0.8553	3.181	0.7633
ARC-R	28	1.588	0.5784	4.169	0.4764
PED-1	30	2.148	0.7291	4.707	0.6315
PED-2	22	1.116	0.5829	2.76	0.361
PED-3	17	2.237	0.8578	2.919	0.7897
PED-4	11	1.481	0.6125	2.331	0.6178
PED-5	38	2.517	0.8409	5.166	0.692
MOL	22	1.567	0.6731	3.336	0.5068
ARC-C1	31	1.992	0.7374	4.282	0.5802
ARC-C2	8	0.461	0.2055	0.976	0.2219
ARC-C3	35	2.723	0.8967	4.943	0.7658
ARC-C4	22	1.717	0.6285	3.588	0.5555
RAS	13	1.263	0.5329	2.244	0.4925
CRIP-C	23	2.342	0.849	3.954	0.7469
CRIP-M	27	2.298	0.8356	3.958	0.6971
JER-B	15	2.499	0.9025	3.746	0.9227
JER-H	28	2.535	0.8889	3.869	0.7607
CAR	19	0.723	0.2548	2.354	0.2455
<i>Temporada lluvias</i>					
ARC-L	23	2.542	0.8891	4.046	0.8106
ARC-R	28	2.651	0.8891	4.545	0.7955
PED-1	19	1.727	0.6475	3.36	0.5866
PED-2	15	1.542	0.6798	2.512	0.5694
PED-3	15	1.714	0.6736	2.556	0.6331
PED-4	12	1.828	0.7637	2.08	0.7355
PED-5	27	1.988	0.7294	3.778	0.6033
MOL	10	1.853	0.7949	1.692	0.8046
ARC-C1	23	1.582	0.6662	3.428	0.5046
ARC-C2	16	1.037	0.5556	2.093	0.3739
ARC-C3	22	2.363	0.8435	3.877	0.7646

Continuación de la *Tabla 9* de los índices de diversidad ecológica por manantial en ambas temporadas*

Clave	Taxa	Shannon (H')	Simpson (D)	Margalef	Equitatividad (J')
ARC-C4	17	1.862	0.758	2.977	0.6573
RAS	17	2.257	0.8558	2.94	0.7965
CRIP-C	16	1.662	0.713	2.761	0.5994
CRIP-M	24	1.904	0.7613	3.215	0.599
JER-B	12	2.205	0.8674	2.857	0.8872
JER-H	24	2.171	0.845	3.549	0.6833
CAR	20	1.186	0.4529	2.525	0.3958

Durante la temporada de estiaje, el índice de Shannon registró valores comprendidos entre 0.461 y 2.723 (*Tabla 9*), mientras que para las lluvias los valores oscilaron entre 1.037 y 2.651. Aunado a esto, la Equitatividad de Pielou, se mantuvo con valores en estiaje de 0.2219 a 0.9227, en cambio, durante las lluvias los valores van de 0.3958 a 0.887, ambos índices asociados a una gran diversidad con un equilibrio en lluvias, observando altos valores en el manantial JER-B.

En cuanto al índice de Simpson, este fue expresado como 1-D, por lo que los valores cercanos a 1 indican menor dominancia y mayor diversidad. Así, los manantiales ARC-C2 y CAR en ambas temporadas, muestran los valores más bajos de acuerdo con el gráfico de barras de abundancia relativa (*Fig. 37b*).

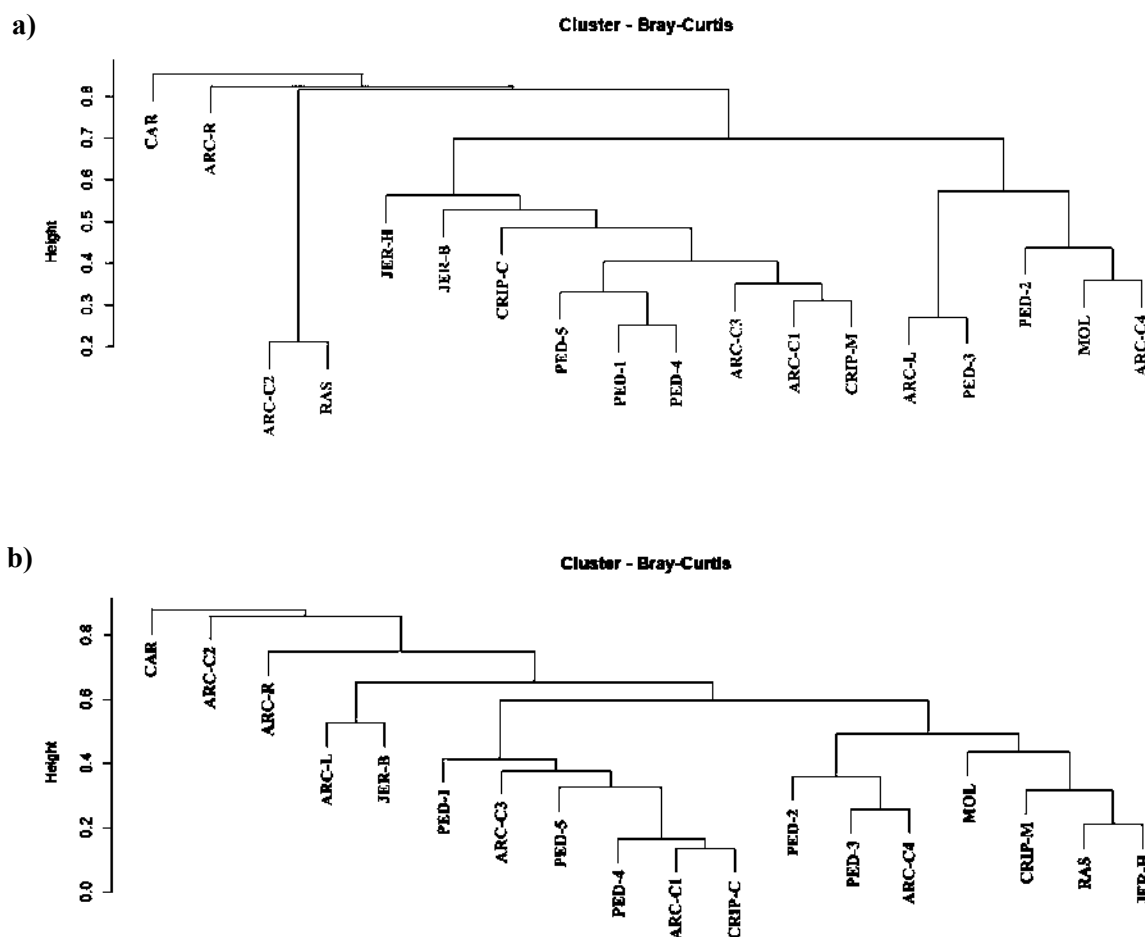
Respecto al índice de Margalef, los valores durante estiaje oscilaron entre 0.976 y 5.166, mientras que durante la temporada de lluvias los valores oscilaron entre 1.692 y 4.545, por lo que la riqueza en la comunidad durante el estiaje fue alta en el manantial PED-5, en tanto que en la temporada de lluvias la riqueza diatomológica se mantuvo constante.

3.12 Análisis multivariados

Para identificar patrones de organización, similitud y agrupamiento entre la comunidad de diatomeas dominantes y subdominantes con los manantiales y el río, se emplearon técnicas de ordenación y clasificación. Permitiendo evaluar la estructura de la comunidad, así como, su asociación con los manantiales vinculados a las variables ambientales de cada sitio registradas durante las temporadas analizadas.

3.12.1 Clúster

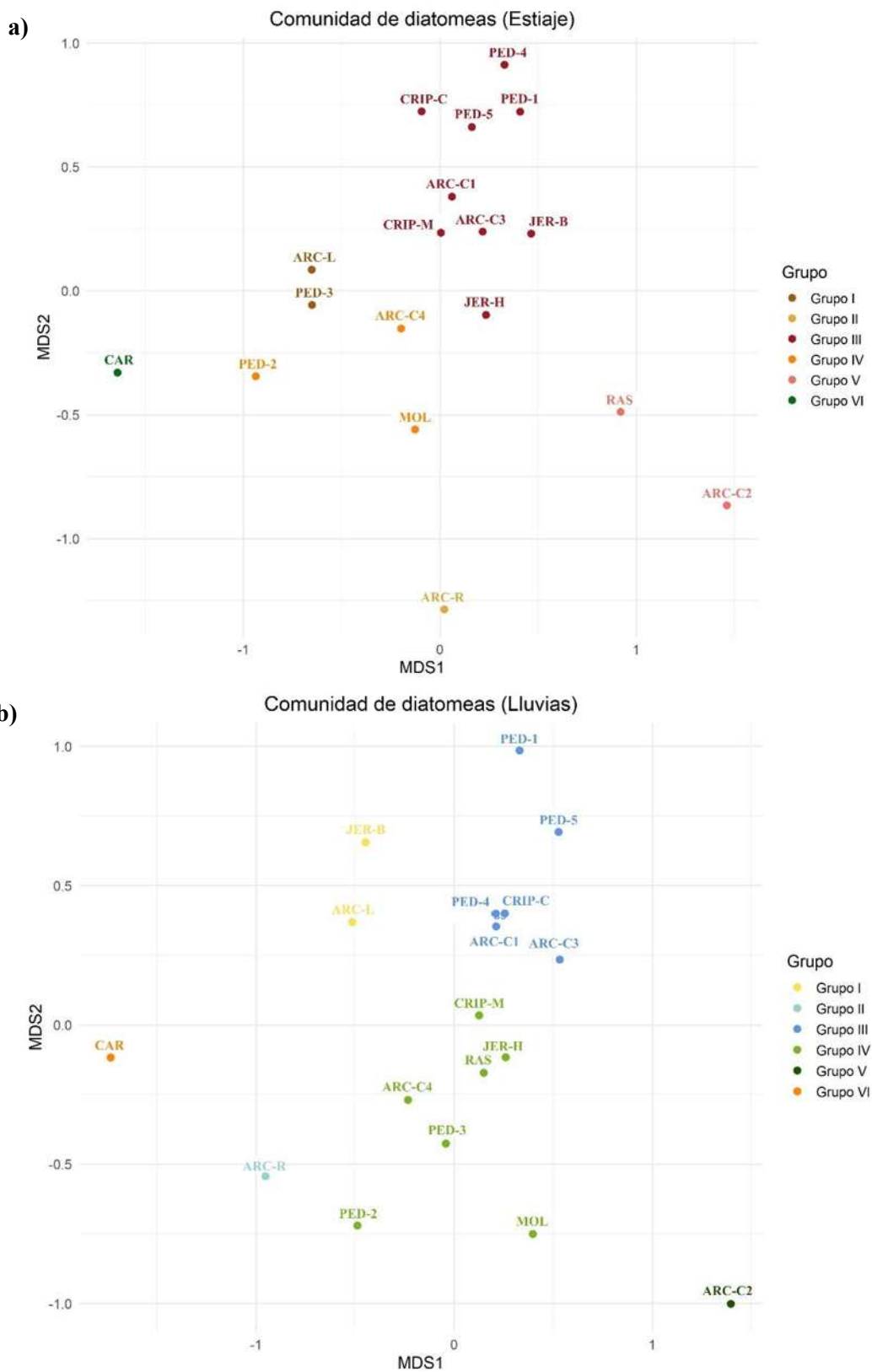
El análisis de conglomerados permitió identificar patrones de similitud en la composición de la comunidad de diatomeas entre los manantiales termales. El dendrograma evidenció la formación de 6 grupos principales en ambas temporadas. En estiaje (*Fig. 38a*) el manantial ARC-L está agrupado con el manantial PED-3 asociados a un grupo de diatomeas. En contraste, con la temporada de lluvias (*Fig. 38b*), donde se observa un arreglo en las agrupaciones y preferencias de las diatomeas, en específico, el manantial ARC-L que es más similar a la composición del manantial JER-B, cambio que es observado en la descripción de la hidrogeoquímica, así como las muestras CAR y ARC-R que están en agrupaciones solitarias en ambas temporadas debido a su composición química reflejada en las diatomeas.

Figura 38. Análisis de conglomerados por temporada: a) Estiaje, b) Lluvias.

3.12.2 NMDS

El análisis de escalamiento no métrico (NMDS) evidenció una diferenciación espacial en la composición de la comunidad de diatomeas en los manantiales estudiados en ambas temporadas. Las agrupaciones mencionadas en los clústeres de los periodos estudiados se reconocen en este análisis por la proximidad espacial de los sitios, así como por su asociación mediante colores en los grupos definidos.

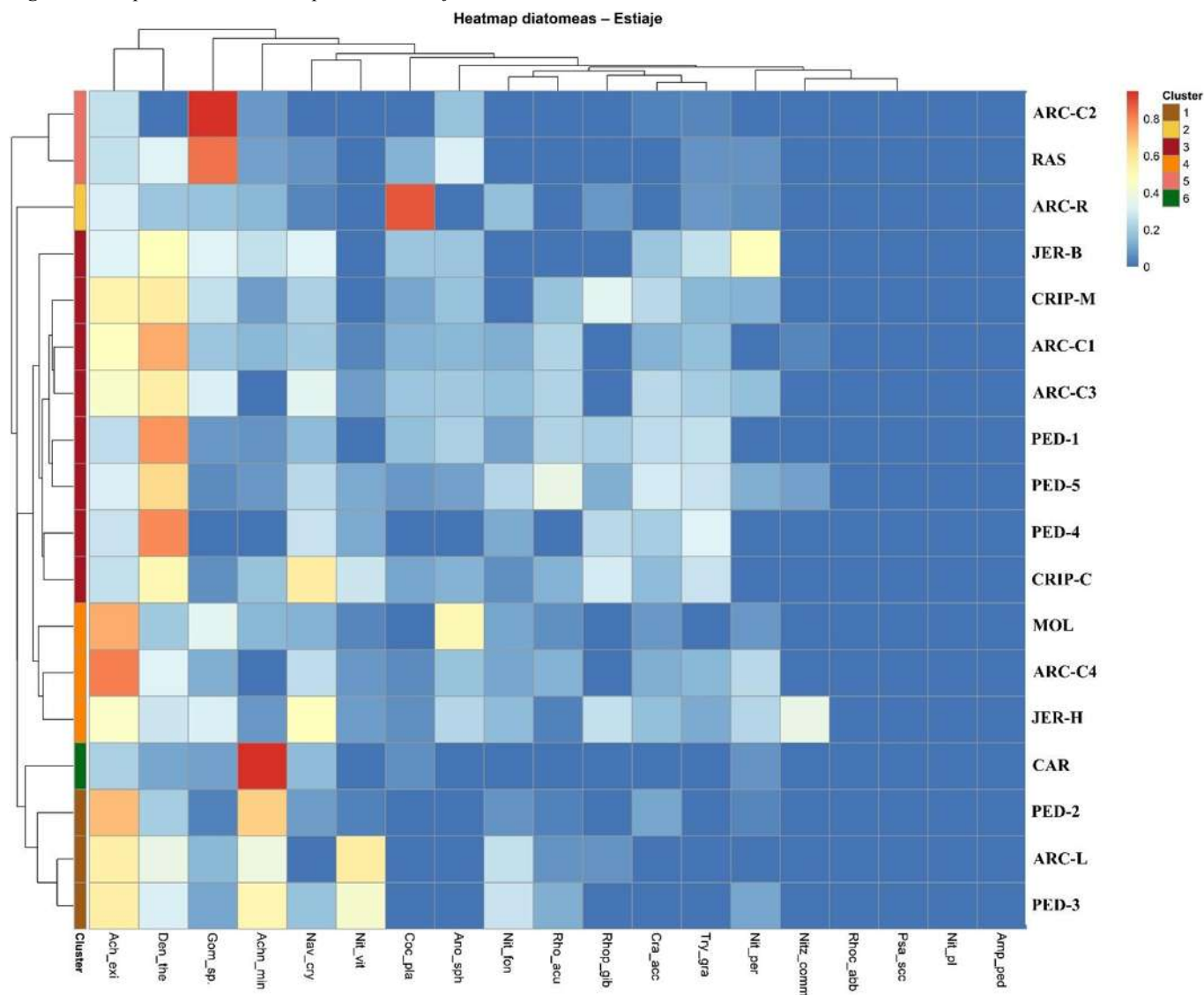
La distribución de las diatomeas durante las temporalidades es visible; durante el periodo seco (*Fig. 39a*) los puntos exhiben una ligera distribución que aún permite ver las proximidades entre cada sitio asociado a las diatomeas representativas de cada agrupación. Por otra parte, durante la estación de lluvias (*Fig. 39b*), los puntos se ven ligeramente más próximos, permitiendo una mejor visualización de las agrupaciones. Es posible observar la separación de ARC-C2 visto en el grupo V en estiaje y la formación de un grupo aislado, señalando una asociación diatomológica distinta, como en los casos de ARC-R y CAR.

Figura 39. *Análisis NMDS para los periodos: a) Estiaje y b) Lluvias*

3.12.3 Mapas de calor

Una vez identificadas las agrupaciones (*Figs. 40 – 41*) de los manantiales, se procedió a realizar mapas de calor para reconocer las diatomeas que están asociadas a cada una de las agrupaciones observadas en el Clúster y NMDS. Se pueden distinguir ocho agrupaciones correspondientes al conjunto de diatomeas, en la *Figura 40* se puede distinguir una distribución con cierta tendencia a la izquierda con colores claros relacionados a abundancias que van de bajas a moderas asociadas a cada uno de los grupos, así como, la presencia de dos tonalidades altas (rojos) y ligeramente altas (naranjas) de abundancia correspondientes a las especies *Gomphonema sp.*, *Achnantheidium minutissimum* y *Cocconeis placentula*.

Figura 40. Mapa de calor de la temporada de estiaje.



Los grupos formados en la *Figura 40*, pueden proporcionar una idea de la relación de las variables ambientales por manantial con la comunidad de diatomeas, donde el *Grupo I* incluye a las especies *Achanthes exigua*, *Achnantheidium minutissimum* y *Nitzschia vitrea* var *salinarum*, especies no tan abundantes, asociados al sector Noreste y Este, representado por un pH ligeramente ácido y mayor mineralización evidenciada por CE, STD, Na y Cl (ARC-L; *Tabla 4 y 5*).

El *Grupo II* está representado por una ligera dominancia de *Cocconeis placentula* asociada a altas concentraciones de Mg y Ca.

El *Grupo III* es ligeramente variado e incluye especies no tan abundantes como lo son *Denticula thermaloides* y *A. exigua*, así como por un ligero aporte de *Nitzschia perminuta* y *Navicula cryptotenella*, este grupo está asociado a sitios con altas temperaturas en los sectores Noreste, Oeste y Centro, relacionados a procesos de interacción agua-roca.

El *Grupo IV* incluye a las especies *A. exigua*, *N. cryptotenella* y *Anomoeoneis sphaerophora* en los manantiales termales de los sectores centro y Oeste relacionados a la dominancia de la facie Na-Cl, característica de sistemas termales asociados al manantial MOL, por la ausencia de información química en los manantiales ARC-C4 y JER-H.

El *Grupo V* está asociado a la presencia única de *Gomphonema* sp. Ante la ausencia de las variables ambientales correspondientes a los manantiales ARC-C2 y RAS, la interpretación se limita a la relación entre las concentraciones presentes durante la temporada de lluvias en estos manantiales. Por lo tanto, pueden estar asociados a altas concentraciones de Na y Cl. Finalmente, el *Grupo VI*, incluye únicamente a la especie *A. minutissimum*, relacionada con una baja mineralización asociada a las bajas concentraciones de CE y STD, así como a un aporte de Mg y Ca.

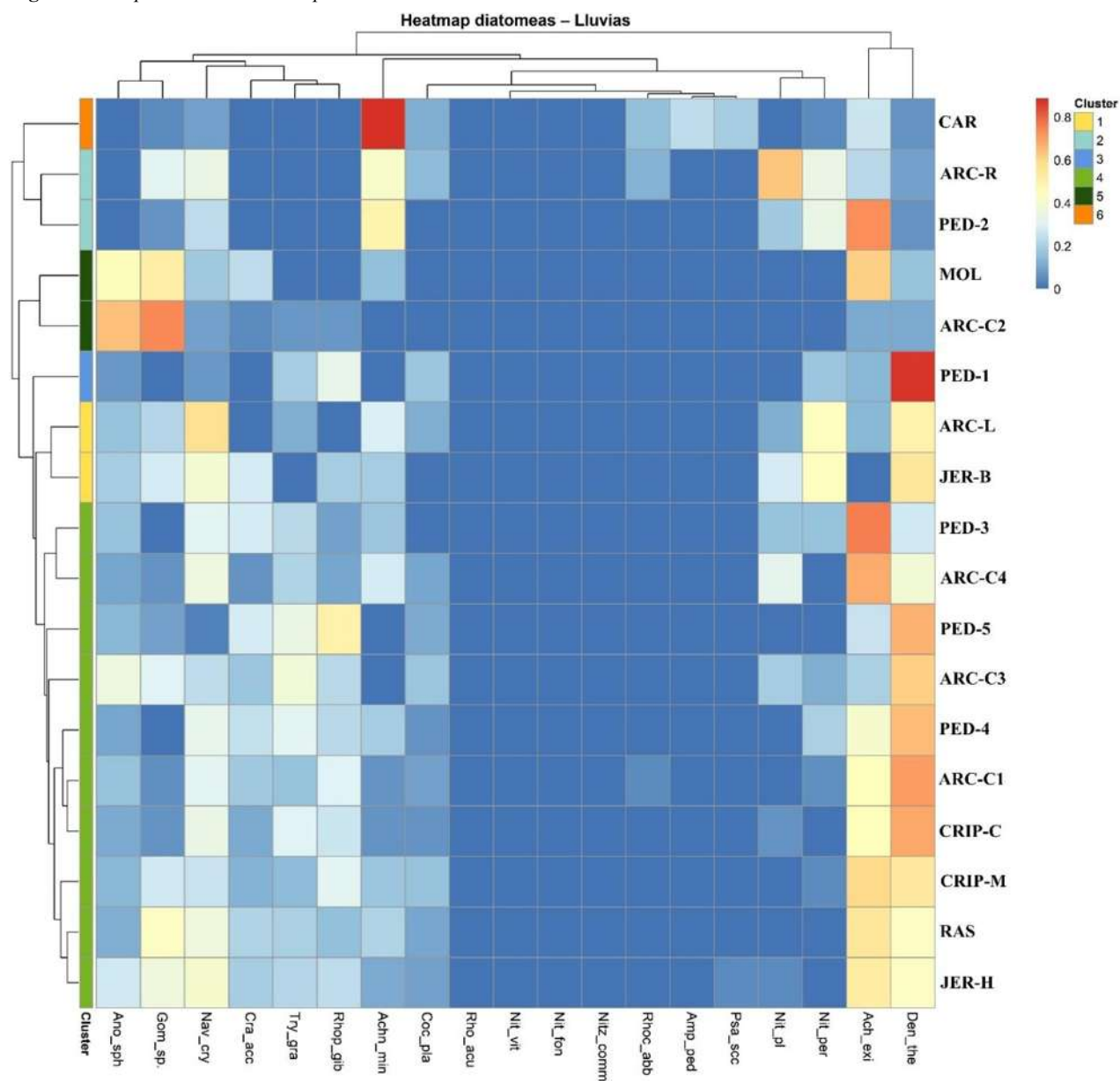
Durante el periodo de lluvias, el patrón de colores se polarizó hacia los laterales del análisis, con colores ligeramente más fuertes del lado derecho (*Fig. 41*). Al igual que en estiaje, las abundancias que influyen en los grupos de manantiales van de bajas a moderadas en su mayoría, con la presencia de picos altos de abundancia relacionados a las especies *A. minutissimum* y *Denticula thermaloides*. Para el periodo de lluvias, las agrupaciones están compuestas por: El *Grupo I* incluye *Nitzschia perminuta*, *N. cryptotenella* y *D. thermaloides* asociadas a concentraciones altas de salinidad y contaminación geotérmica debido a la presencia de elementos presentes en el termalismo.

El *Grupo II* está compuesto por las especies *A. minutissimum*, *A. exigua* y *Nitzschia* aff. *palea* asociados a concentraciones de pH de neutro a ligeramente alcalino (7.7 a 8.22) con una presencia de bicarbonatos ligeramente alta y cierto grado de contaminación por la presencia de la especie del género *Nitzschia*.

El *Grupo III* está representado por la presencia única de *D. thermaloides*, asociada a altas temperaturas con un grado de mineralización ligeramente alto.

El *Grupo IV* fue más diverso con la presencia de *D. thermaloides*, *A. exigua* y un ligero aporte de las especies *Rophalodia gibberula*, *Tryblionella granulata*, *N. cryptotenella*, *Gomphonema* sp. y *Anomoeoneis sphaerophora*. Al igual que lo observado durante el estiaje, se relaciona con condiciones de mineralización, atribuibles a procesos de interacción agua-roca con concentraciones altas de Na-Cl.

Figura 41. Mapa de calor de la temporada de lluvias.

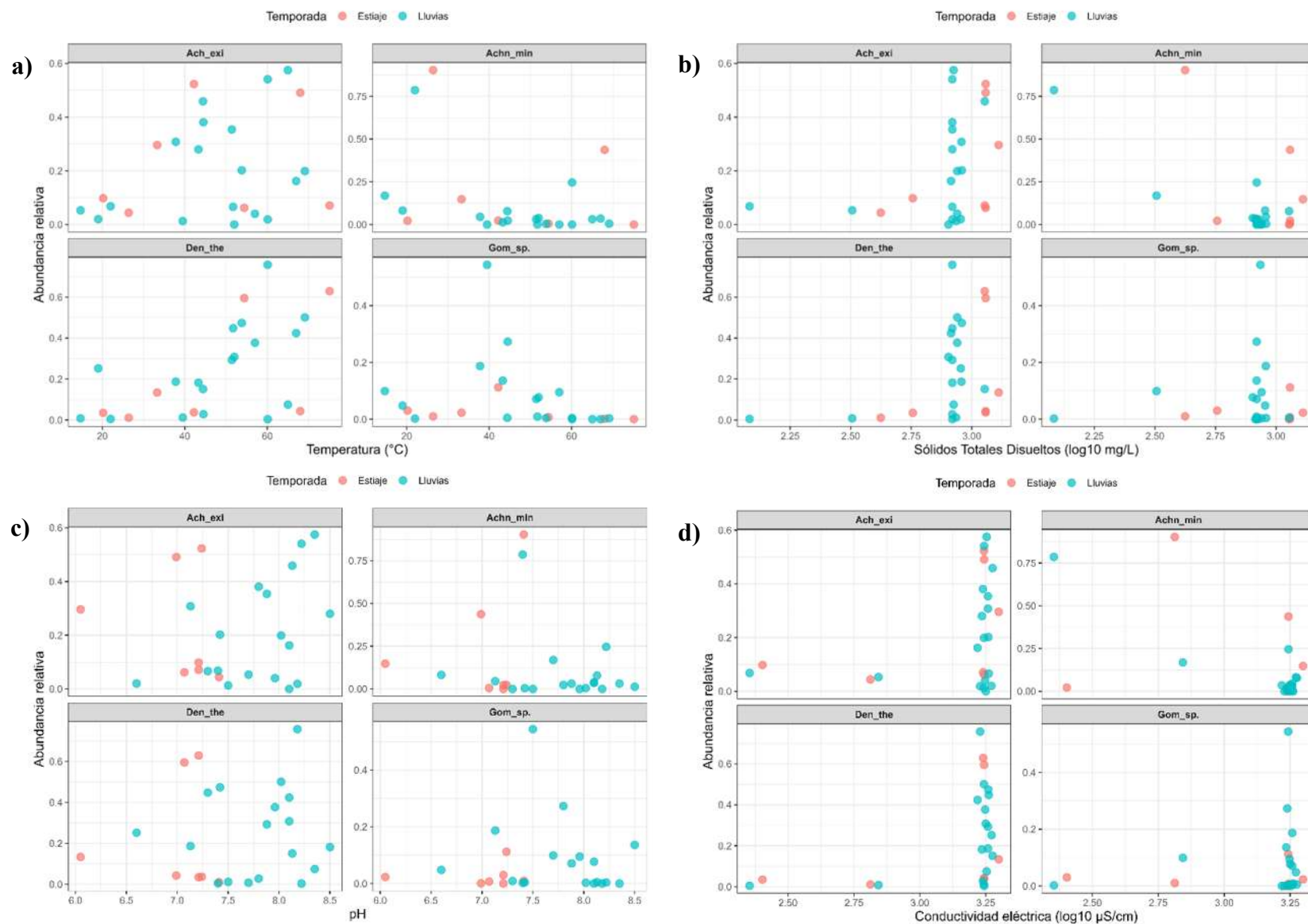


El Grupo V afín a las especies *Anomoeoneis sphaerophora* y *Gomphonema sp.* con una contribución secundaria de *A. exigua*, asociadas a las concentraciones altas de Fluoruros, Boro y Arsénico. Por último, el Grupo VI se relaciona con la presencia de *A. minutissima*, mostrando un patrón de distribución similar al observado durante la temporada de estiaje (Grupo VI), caracterizado por una amplia tolerancia ambiental.

3.13 Relación ambiente – especie

Con el objetivo de identificar la relación entre la comunidad de diatomeas y las variables ambientales de cada uno de los sitios muestreados, se elaboraron gráficos de dispersión y análisis multivariados, con propósito de exploración. Inicialmente, se realizaron gráficos de dispersión entre las especies dominantes y los parámetros fisicoquímicos.

Figura 42. Análisis exploratorio de las especies dominantes del estudio, en relación con las variables ambientales: a) Temperatura; b) Sólidos Totales Disueltos; c) pH; d) Conductividad Eléctrica.



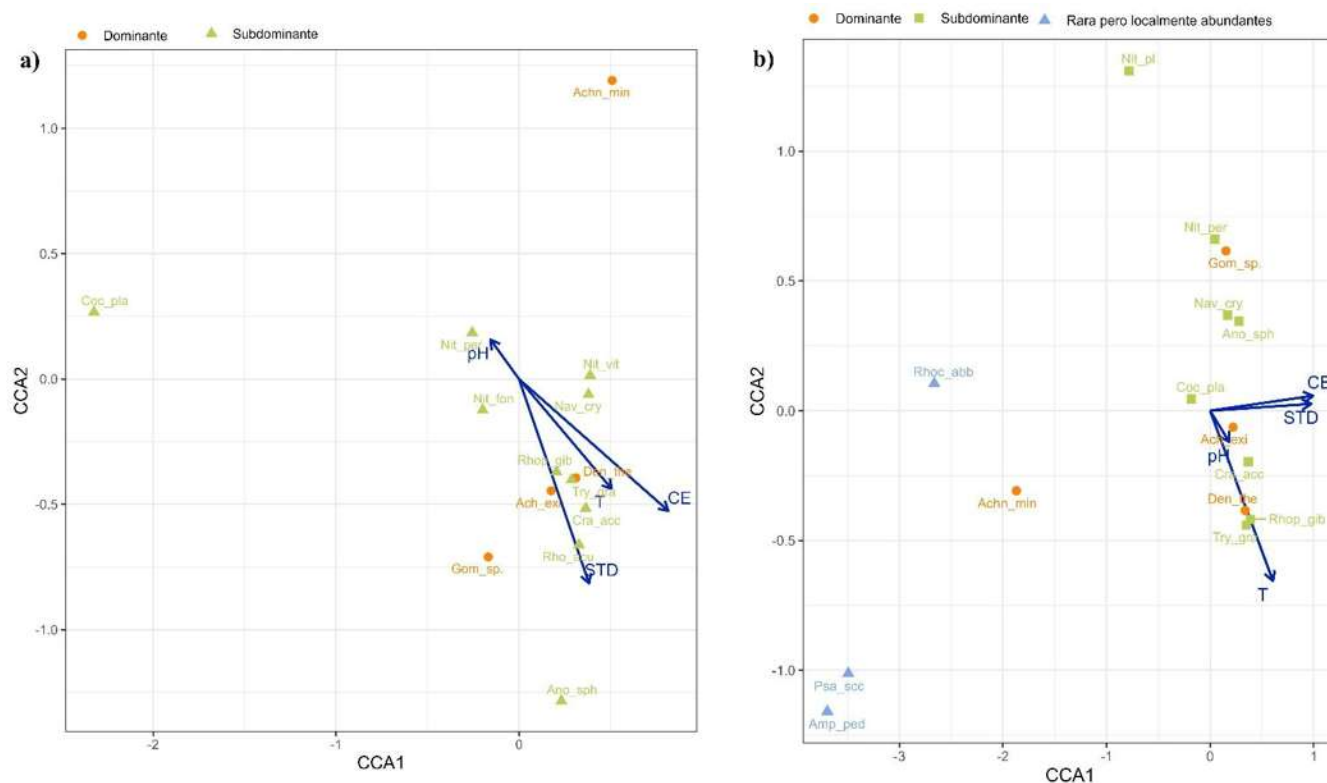
En los gráficos de dispersión se puede observar que la temperatura (Fig. 42a) no es un factor que influye en las especies dominantes, salvo *D. thermaloides*, que muestra una ligera tendencia hacia altas temperaturas. Mismo patrón se observa en *A. exigua* para el pH (Fig. 42c).

3.13.1 Análisis de Correspondencia Canónica

Posteriormente, se aplicó un Análisis de Correspondencia Canónica (CCA), para corroborar las tendencias identificadas en el análisis exploratorio. Se integraron especies dominantes y subdominantes con las variables ambientales, lo que permitió evaluar la influencia de manera conjunta de los gradientes fisicoquímicos sobre la estructura de la comunidad.

En la *Figura 43*, se pueden observar las asociaciones de las diatomeas dominantes y subdominantes con los parámetros fisicoquímicos relativos a los manantiales y el río, evidenciando la relación Temperatura-CE-STD en el sistema termal durante estiaje, representado por las diatomeas *A. exigua*, *Rhopalodia gibberula*, *Rhopalodia acuminata*, *D. thermaloides*, *Craticula accomoda* y *Tryblionella granulata*, mismo grupo de diatomeas, asociado a altas temperaturas, mientras que *A. exigua* se relaciona a concentraciones de pH ligeramente ácido como se observó en la *Figura 42*.

Figura 43. *Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de la fisicoquímica durante: a) Estiaje y b) Lluvias.*

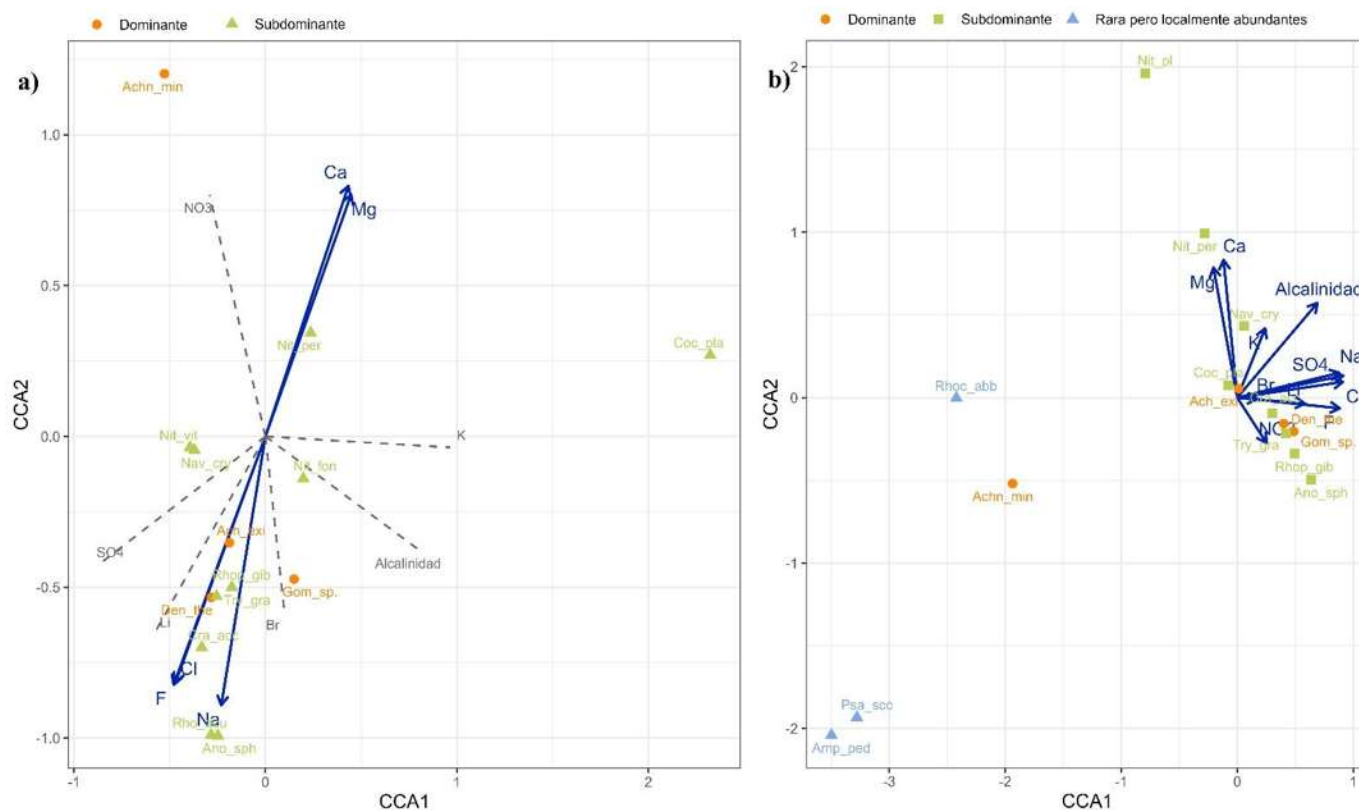


En la *Figura 44*, en el periodo de estiaje el CCA mostró una relación entre las especies *A. exigua*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *R. gibberula*, *R. acuminata*, *D. thermaloides*, *C. accomoda* y *T. granulata* con afinidad hacia altas concentraciones de los aniones Cl^- y F^- , y los cationes Na^+ , misma relación que se observa en la temporada de lluvias con una tendencia a los nitratos (NO_3^-). Así como la asociación entre los cationes Ca^{+2} y Mg^+ a *Nitzschia perminuta* en ambas temporadas. La especie *Gomphonema sp.* se relaciona con altas concentraciones de Br^- , *Nitzschia fonticola* a valores altos de Alcalinidad ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{+2}$), a su vez, *Nitzschia vitrea* var. *salinarum*, *A. minutissimum* a posibles

concentraciones de (NO_3^-) , debido a que se encuentra alineado al vector y *Navicula cryptotenella* se asocia a concentraciones de SO_4^{2-} durante el estiaje; por otro lado, la especie *N. cryptotenella* presentó una asociación al K^+ en lluvias.

Por último, en la Figura 45 las especies *A. exigua*, *A. sphaerophora*, *N. var. salinarum*, *R. gibberula*, *R. acuminata*, *D. thermaloides*, *C. accomoda* y *T. granulata* están relacionadas a concentraciones altas de As y B, elementos característicos del termalismo y contaminación en el caso del Arsénico.

Figura 44. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) relativo a los aniones y cationes en: a) Estiaje y b) Lluvias.

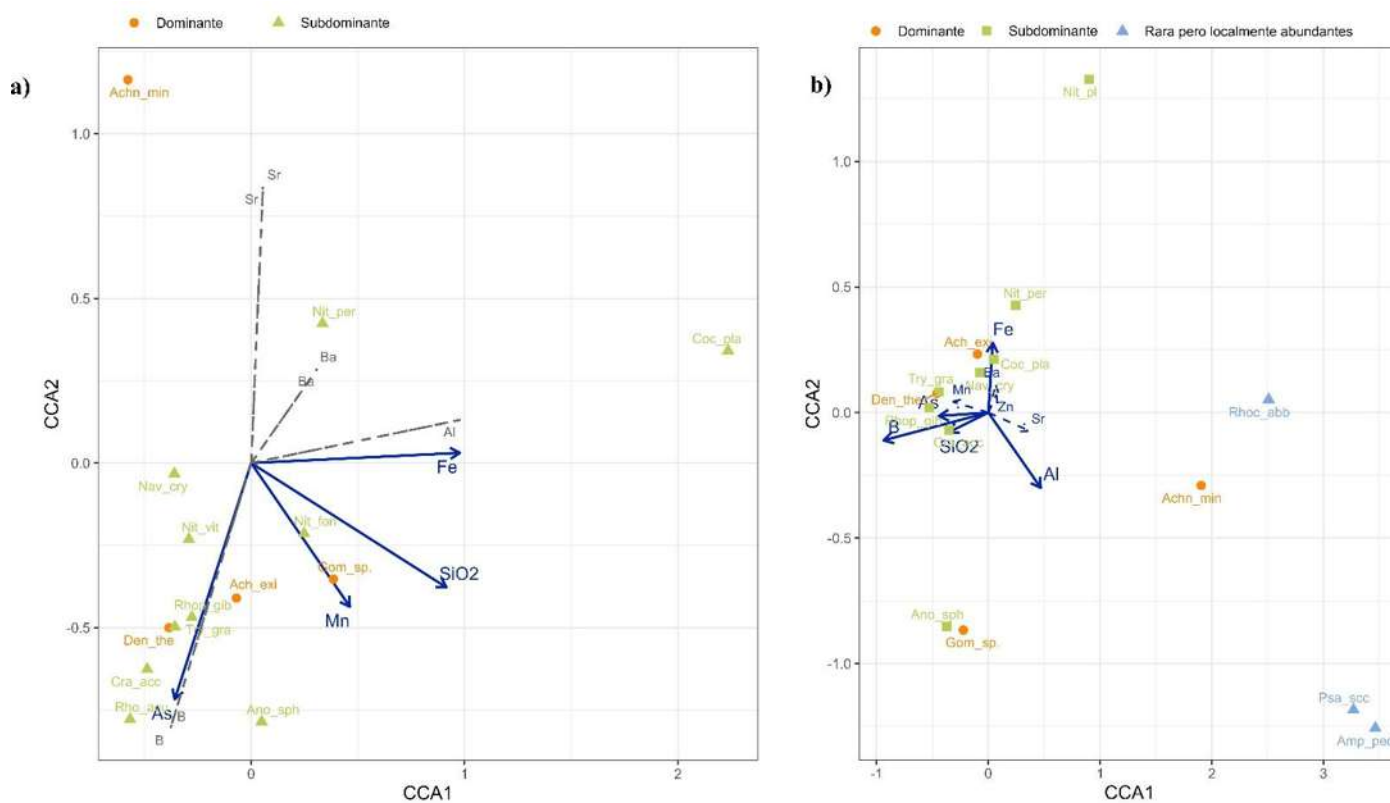


Las especies *Gomphonema sp.* y *Nitzschia fonticola* son afines a concentraciones de Manganeso (Mn); así, la especie *N. perminuta* se asocia al Bario (Ba) durante el estiaje.

En lluvias, las especies *A. exigua*, *C. placentula*, *N. cryptotenella* y *N. perminuta* están relacionadas a altas concentraciones de Fe y Ba, en cambio, las especies con afinidad al As y B vistas en estiaje, muestran una preferencia distinta. Las especies *D. thermaloides* y *T. granulata* mostraron afinidad al Manganeso (Mn), *R. gibberula* mantiene su afinidad al Arsénico (As) y *C. accomoda* a concentraciones de sílice (SiO_2) altas y Boro (B).

Las especies alejadas de los vectores como *A. minutissimum*, *Nitzschia palea* y las especies raras pero localmente abundantes, presentan tendencias distintas a las analizadas en los manantiales termales, el manantial Carano y el Río.

Figura 45. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de la relación ambiental entre las diatomeas y los elementos traza en: a) Estiaje y b) Lluvias.



Capítulo 4. Discusión

4.1 Fisicoquímica de los manantiales

Los manantiales termales correspondientes a los sectores Noreste, Este (ARC-L), centro y Oeste exhibieron una variabilidad térmica considerable durante la temporada de estiaje con valores de descarga entre 33.3 a 75.1 °C. Los rangos correspondientes al periodo de lluvias oscilaron de 37.8 a 69.1 °C (*Tabla 4*). Estos rangos de temperaturas son muy similares a los presentados por Castillo-Ramírez (2023) que reporta temperaturas que van desde 40.5 a 84.1 °C en las manifestaciones termales de Puruándiro, producto de una fuerte actividad termal. Castillo-Ramírez (2023) menciona que los sitios con temperaturas de 20 °C no son de carácter termal, por lo que para ambas temporadas el sitio ARC-R, al ser un río con temperaturas de 14.7 a 20.1 °C y el manantial ACR-L con una temperatura en lluvias de 19 °C quedan dentro de esa clasificación. Por otro lado, el manantial ACR-L durante el primer muestreo presentó una temperatura de 33 °C, en conjunto, el manantial Carano donde sus temperaturas para ambas temporadas van de 26 °C en estiaje a 22 °C en lluvias son considerados, según la Asociación Europea de Balnearios, como termales al ser manantiales con nacimiento de agua y temperaturas superiores a los 20 °C; también se menciona que temperaturas entre los 25 ° y los 34 °C son considerados como aguas tibias (Gurung & Yangden, 2025).

La conductividad eléctrica (CE) (648.51 a 1,988.37 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 696 a 1,885 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y los sólidos totales disueltos (STD) (420 a 1,290 ppm – 320 a 1,130 ppm) presentaron una ligera variación entre las temporadas de estiaje y lluvias, donde la conductividad eléctrica es asociada a aguas salobres influenciadas por actividad termal (Jácome-Paz, 2019) y el incremento de los sólidos totales disueltos respecto a la temperatura (>40 °C) se atribuye a iones disueltos o productos de la interacción agua-roca (Castillo-Ramírez, 2023); siguiendo la misma tendencia, las mediciones de la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos se relacionan para conocer el grado de salinización de las aguas subterráneas (Teramoto & Chang, 2020), grado de salinidad que fue explicado por el Análisis de Componentes Principales (PCA) *Figura 30* con el 60% de la varianza total del sistema.

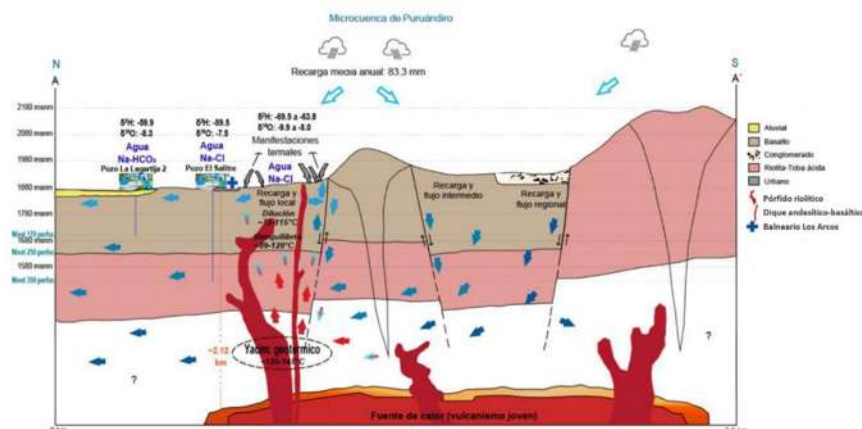
El incremento de la conductividad y los sólidos totales disueltos en función de la temperatura vistos en la *Figura 24b* y *24c* lo hace un patrón característico de aguas con influencia geotérmica, debido a una mayor mineralización asociada a procesos de interacción agua-roca y tiempos prolongados de residencia (Morales-Arredondo et al., 2018).

4.2 Caracterización hidrogeoquímica y definición de facies

Los manantiales termales en ambas temporadas presentan una dominancia de las concentraciones de Na^+ , Cl^- y HCO_3^- , observada en los diagramas de Piper (*Figs. 30 – 31*) y Stiff (*Figs. 32 – 33*) con una facie clorurada sódica y dos facies bicarbonatadas, una cálcica y/o magnésica (estiaje *Fig. 30*) y otra sódica (ambas temporadas), asociadas al manantial Carano (CAR) y el Río (ARC-R).

La dominancia de Na-Cl, según Martínez-Florentino et al. (2021), deriva de un flujo de agua subterráneo regional, con una zona de recarga situada en las estribaciones de un volcán a cierta profundidad, donde este es calentado por el gradiente geotérmico y la actividad tectónica, dando lugar a la mezcla con salmueras. Conforme el producto viaja a través de un sistema de fallas, entra en contacto con aguas de reciente infiltración, produciendo mezcla o dilución de aguas. Dado que el

Figura 46. Modelo geohidrológico-hidrotermal de Puruándiro. Tomado de Castillo-Ramírez (2023).



favorecida por la presencia de fallas normales a través de la escorrentía pluvial rica en HCO_3^- , ocurre de Sur a Norte, debido a la presencia de altos topográfico compuesto por derrames y conos de lava. Asimismo, menciona que el régimen magmático de la zona puede estar compuesto por un basamento de origen litológico de tipo poroso, subyacente a las riolitas-tobas ácidas de la región o a la presencia de un pórfido riolítico de mayor edad y profundidad.

La dominancia de las concentraciones Na-Cl explicadas por Jácome-Paz (2019) que asocia las altas concentraciones de Cl a un proceso de mezcla, de un agua causada por flujo profundo caracterizado por condiciones ácidas y reductoras en contacto con un agua superficial bicarbonatada, similar a lo mencionado por Castillo-Ramírez (2023) al realizar un gráfico de entalpía respecto al cloro indicando procesos de mezcla y dilución. Las altas concentraciones del catión sodio (Na^+) son atribuidas a la interacción agua-roca. Así como, las altas concentraciones de calcio (Ca^{2+}) relacionadas a la interacción con rocas lacustres calcáreas y, las altas concentraciones de magnesio (Mg^{2+}) por la dilución de rocas carbonatadas (Ibarra-Olivares et al., 2023). Estos cationes se vieron añadidos en el sitio ARC-R (Río) durante las lluvias con concentraciones de 25.77 mg/L para el Calcio y 11.24 mg/L para el Magnesio, en conjunto con la presencia de K^+ en ambas temporadas con concentraciones de 19.64 mg/L y 24.26 mg/L respectivamente, las cuales se deben también a una interacción agua-roca, por la presencia de feldespatos potásicos presentes en las rocas ígneas de la región (Castillo-Ramírez, 2023).

Asimismo, las geometrías observadas en el diagrama de Stiff para el Río (ARC-R) (ambas temporadas) y el manantial CAR en estiaje, presentaron formas similares vistas en Teramoto & Chang (2020) que es asociada a la pérdida del agua potable subterránea debido a los altos valores de F, relacionado a procesos de evaporación e interacción agua-roca generados por la disolución de minerales como fluorita o biotita (Figura 47, cuadro rojo).

Aunado a esto, la geometría del manantial Carano (CAR), durante las lluvias con bajas concentraciones de Na^+ (27.08 mg/L) y HCO_3^- (65.36 mg/L) puede estar relacionada a la dilución de aguas, en especial de Mg^{2+} y Ca^{2+} (Fig. 33). La

área no presenta actividad volcánica, Castillo-Ramírez (2023) realizó un modelo geohidrológico-hidrotermal (Fig. 46) de las manifestaciones termales ubicadas en la Cabecera Municipal de Puruándiro, donde señala que la recarga hídrica, probablemente

Figura 47. Diagramas de Stiff de aguas subterráneas con pérdida de potabilidad por salinidad (Teramoto & Chang, 2020).

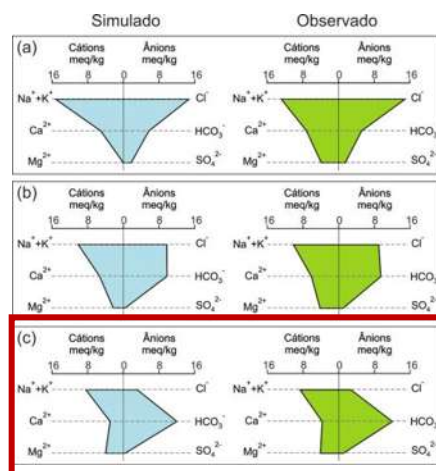


Figura 48. Diagramas de stiff de aguas subterráneas y superficiales (Palacios, 2024).

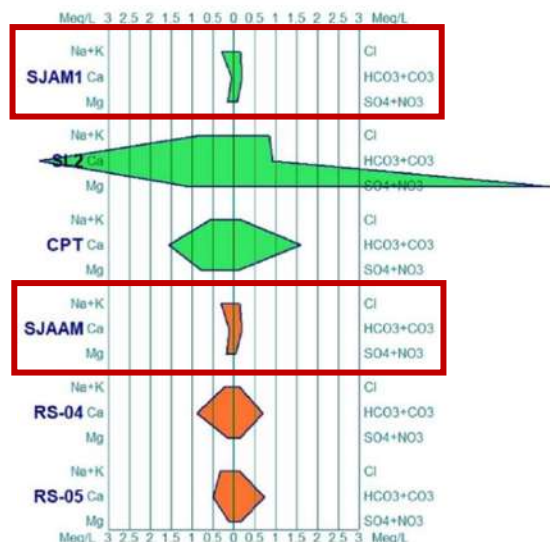


figura de este sitio es similar a las formas vista en Palacios (2024) asociadas a altas concentraciones de Mercurio (contaminación), muestras correspondientes a un agua subterránea cercana al acceso de una mina (SJAM1) y una muestra superficial asociada a un río (SJAAM) (Figura 48, cuadros rojos). En contraste, durante la temporada de estiaje el manantial Carano presentó altas concentraciones de NO_3^- (67.1 mg/L) respecto a los demás manantiales, asociadas a cierto grado de contaminación antrópica producto de la presencia de actividad agrícola derivada de los cultivos de maíz que delimitan al manantial, indicando que, además del aporte profundo relacionado con la facie química principal, se presenta un aporte secundario atribuido al uso de suelo.

En relación con las altas concentraciones de NO_3^- durante las lluvias, el manantial ACR-C1 registró una concentración de 246.33 mg/L, seguido de los manantiales ACR-C2 (110.73

mg/L) y ARC-C3 (69.95 mg/L), a causa de que es un poco difícil estimar la procedencia de tan elevadas concentraciones, se cree que pudieran proceder de fosas sépticas mal selladas o descargas grises cercanas, eses de ganado, perros, caballos, etc., o posiblemente al uso recreativo del sitio, observado en la temporada de estiaje, relacionado a elementos como jabón, detergentes o residuos orgánicos.

Para el manantial ACR-L el aumento de SO_4^{2-} durante la temporada de lluvias puede estar asociado a la lixiviación de rocas con contenido de yesos o con suelos sulfatados (Ibarra-Olivares et al., 2023).

4.3 Elementos traza como indicadores de procesos naturales y antrópicos

La presencia de concentraciones elevadas de elementos como B, As y Li sugiere la influencia de un entorno hidrotermal activo. En este sentido, Martínez-Florentino et al. (2021) señalan que el Boro suele estar asociado a aguas evaporadas y constituye un componente común en zonas volcánicas y geotérmicas, debido a diversos procesos como interacción agua-roca, desgasificación de aguas geotérmicas y la presencia de salmueras. De manera complementaria, Morales-Arredondo et al. (2018) indican que las concentraciones proporcionales de Li, B y Cl^- pueden presentar cierto grado de madurez, particularmente cuando el Cloro presenta concentraciones mayores respecto al Boro y Litio, por la salinidad del agua y una posible migración ascendente de aguas.

Las concentraciones de Cl^- en el presente estudio van de 28.92 – 361.17 mg/L en estiaje y de 6.13 – 325.83 mg/L en lluvias, siendo más altas que las concentraciones de B, donde los valores son 0.136 – 3.81 mg/L y 0.390 – 4.320 mg/L, y para el Litio los rangos oscilan entre 0.60 – 0.78 mg/L y 0.025 – 0.069 mg/L, mostrando una tendencia constante en sistemas hidrotermales de circulación somera.

Paralelamente, las concentraciones de Arsénico en aguas subterráneas termales están asociadas a la presencia de Li, B y Si, comunes en sistemas geotérmicos como lo es el caso de Los Azufres, donde los manantiales termales de baja temperatura con asociación Na-Cl presentan valores de As de 3 mg/L, 65 mg/L para el B y 6.9 mg/L para el Li, sugiriendo un origen de circulación profunda e

interacción agua roca fuerte. En contraste, las aguas termales de Jungapeo (Michoacán), los valores de Arsénico oscilan entre 0.001 y 0.037 mg/L resultantes de una mezcla de aguas meteóricas con fluidos termales enriquecidos con CO₂ resultantes del flujo regional y un remanente de calor de un cuerpo magmático basáltico (Martínez-Florentino et al., 2021).

Las manifestaciones termales revisadas en Jungapeo presentan valores comparables a las analizadas en este estudio, donde los valores de As oscilan entre 0.065 – 0.091 mg/L en estiaje y 0.025 – 0.085 mg/L en lluvias, observando concentraciones similares en el estudio realizado por Castillo-Ramírez (2023) en las manifestaciones termales de Puruándiro, donde sus concentraciones de As van de 0.043 a 0.091 mg/L, proponiendo que el depósito ígneo está compuesto por andesitas-basálticas y basaltos con una profundidad de 250 m, determinando ahí, la zona donde ocurre el proceso de dilución, albergando aguas meteóricas que diluyen a las de tipo geotérmico.

4.3.1 Elementos tóxicos y su relación con afecciones a la salud.

La mayoría de los problemas de salud relacionados con el agua se deben a la contaminación microbiana, pero un número considerable de casos se deben a la presencia de elementos químicos nocivos con efectos diversos a la salud en periodos prolongados (Organización Mundial de la Salud, 2017).

Las altas concentraciones de elementos traza (Al, Mn, Fe, F, B, As) derivados de las manifestaciones termales de Puruándiro (*Fig. 28*), así como, las altas concentraciones de contaminantes derivados de la actividad agrícola (NO₃) (*Fig. 27d*), sobrepasan los límites máximos permisibles y los recomendados para agua potable establecidos por la OMS y la NOM-127-SSA1-2017. Por lo que es necesario, establecer estrategias de control y vigilancia de la calidad del agua para prevenir riesgos a la salud de la población, así como, un buen manejo del uso de suelo. En la *Figura 49*, se observa la asociación de los manantiales con el tipo de contaminación, ya sea ambiental o antrópica, en ambas temporadas.

Se realizó un mapa de sitios (*Fig. 49*) donde se muestra el tipo de contaminación asociada a las variables geotérmicas, ambientales y antrópicas de la Cabecera Municipal de Puruándiro. Por ende, es importante describir las posibles afecciones por la exposición prolongada a estos contaminantes, mencionados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2017):

La exposición prolongada a concentraciones altas de *Aluminio* (Al) puede estar relacionada con la aparición temprana de la enfermedad de Alzheimer. Así mismo, niveles elevados de *Manganeso* (Mn) se han asociado a efectos adversos en el aprendizaje de los niños. Las enfermedades relacionadas con los elementos Al y Mn aún no tienen una base sólida, por lo que aún es una teoría en comparación con el consumo elevado y prolongado del *Arsénico* (As), donde el grado de afección depende de la eliminación del cuerpo. Los signos de arsenicismo crónico van desde la hiperpigmentación e hipopigmentación de la piel, la neuropatía periférica, cáncer de vejiga, piel, riñón, pulmón, hasta la enfermedad vascular periférica. En periodos de exposición de 5 años, las enfermedades dérmicas son más comunes, en contraste, a un periodo más largo (7 años aproximadamente), donde la afección aparece en el sistema cardiovascular de niños que consumieron agua contaminada por Arsénico.

El consumo elevado de Fluoruros (F) causa efectos en los tejidos óseos, fluorosis esquelética y dental, dependiendo del grado de ingesta. Para las enfermedades relacionadas al Boro (B), las afecciones

aún no han sido observadas en seres humanos, sin embargo, en estudios realizados en animales de laboratorio se observaron afecciones en el aparato reproductor masculino y problemas gastrointestinales.

Los nitratos pueden contaminar aguas mediante la actividad agrícola, disposición de aguas residuales y la oxidación de heces humanas y animales, incluido el contenido de tanques sépticos, causando posibles daños en la glándula tiroides y dando lugar a la cianosis, enfermedad conocida como el síndrome del bebé azul, debida a la pérdida del transporte y liberación de oxígeno en los tejidos.

La presencia de nitratos derivados de actividades humanas en las aguas termales del sector Este y Norte son altas, debido a que exhiben un límite de detección mayor de 50 mg/L establecido por la OMS (2011). Por lo que es necesario instar a las autoridades pertinentes de la Cabecera Municipal de Puruándiro a tomar las medidas necesarias para la disminución de este contaminante con el propósito de mantener la salud de la población.

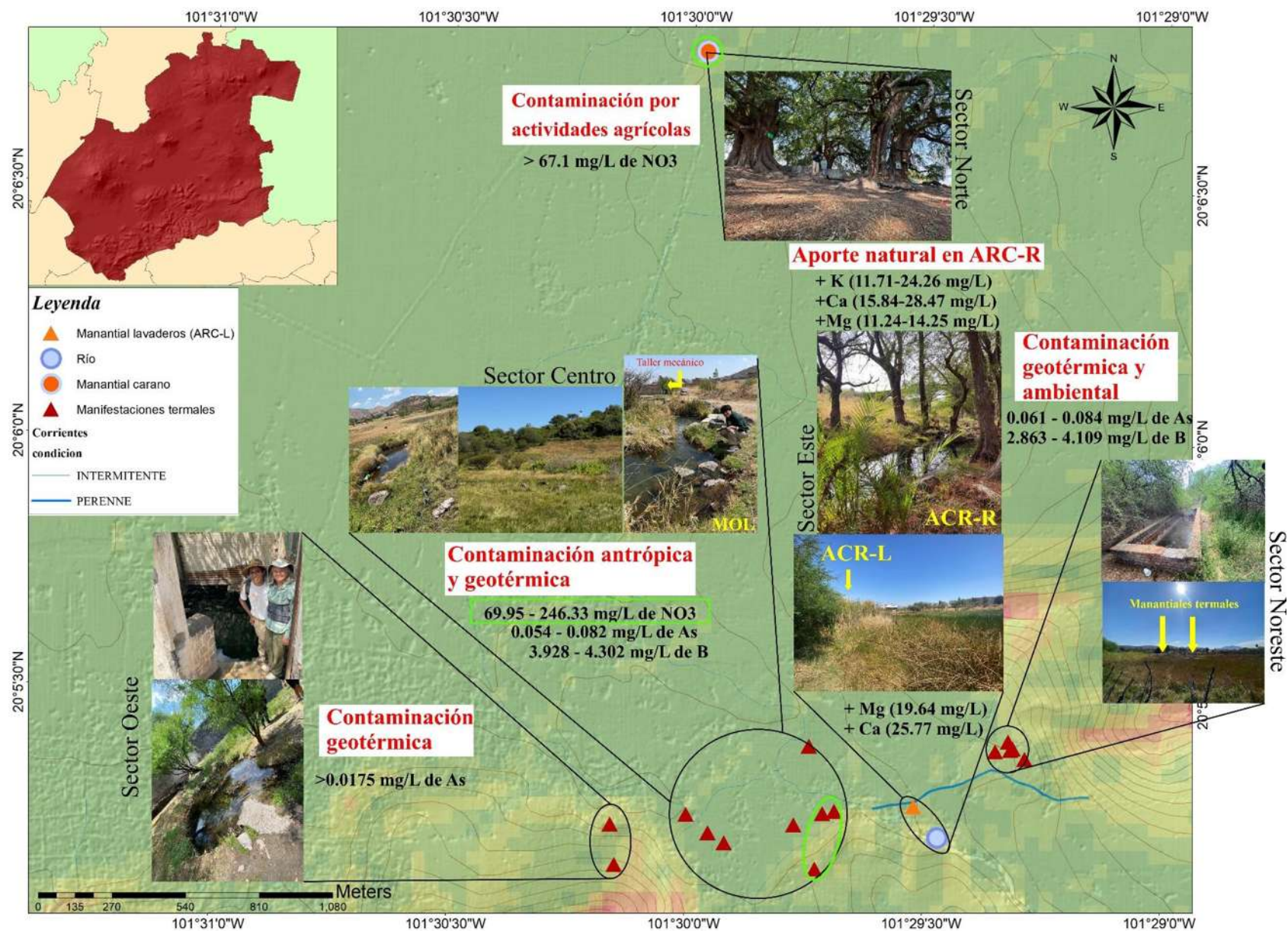
Y, por último, las enfermedades causadas por Mercurio (Hg) se observan en los riñones, con un aumento de peso absoluto y relativo, necrosis tubular, proteinuria e hipoalbuminemia en roedores, mientras que en humanos producen gastritis hemorrágica y colitis, con una mayor afección en los riñones. El Mercurio no es un elemento medido pero que valdría la pena revisar, puesto que, fue observado en las manifestaciones termales de Cuitzeo y en los manantiales termales de Tzitzio, por lo cual es importante mencionar el posible daño tóxico que este podría propiciar a la población.

4.4 Comunidad diatomológica

La estructura de la comunidad de diatomeas en los manantiales termales analizados evidenció una dominancia marcada de un número reducido de especies. En la *Figura 37b*, *Achnanthes exigua* se encuentra presente en todos los manantiales, al ser una especie cosmopolita, es tolerable a distintas temperaturas con una óptima de desarrollo en aguas alcalinas con contenidos de electrolitos moderados a elevados (Rivera et al., 2018) y a una temperatura de 40 °C (López-Sandoval et al., 2016). También, presenta una tolerancia a altos intervalos de contaminación y niveles de oxígeno disuelto bajo (Andrade-Servín & Israde-Alcántara, 2021). Así mismo, esta especie fue observada en las manifestaciones termales de Galicia, España (Leira et al., 2017), Kamchatka, Rusia (Nikulina & Kociolek, 2011; Nikulina et al., 2019), y en las manifestaciones termales de Los Azufres, Michoacán (López-Sandoval et al., 2016). De igual forma *A. exigua* fue vista junto con la presencia de *Anomoeoneis sphaerophora* en Kenia (Owen et al., 2008) y el norte de Tailandia (Pumas et al., 2018).

Achnanthes exigua fue abundante en los manantiales PED-2, PED-3, MOL y ARC-C4 con temperaturas que oscilan entre 42.2 y 68 °C en ambas temporadas, con una mayor abundancia en ARC-C4 en estiaje y PED-3 (65 °C) en lluvias. Fue observada en concentraciones de fluoruros (F^-) de 11.56 mg/L en lluvias por su abundancia en PED-3. De manera similar, *Denticula thermaloides* está presente en la mayoría de los manantiales, resaltando su abundancia en PED-4 con una temperatura de 75.1 °C en estiaje, mientras que, en lluvias su abundancia fue alta en PED-1 con una temperatura de 60.1 °C.

Figura 49. Mapa de sitios con presencia de contaminación en la Cabecera Municipal de Puruándiro, Michoacán.



La presencia ecológica de *D. thermaloides* aún es limitada, en un estudio realizado en India es asociada a entornos epilíticos/epífíticos (Kumar et al., 2023).

Las especies *A. exigua* y *D. thermaloides* fueron consideradas como termófilas y halófilas por su presencia y abundancia en las manifestaciones termales. La especie *A. exigua* presentó un óptimo desarrollo en temperaturas que rondan los ~65 °C, mientras que *D. thermaloides* alrededor de ~75 °C. Es importante señalar, que ambas especies no fueron abundantes en aguas muy diluidas como lo son el manantial Carano y el río (dentro del Balneario Los Arcos), por lo que son relacionadas a ambientes con salinidad variable, siendo para *A. exigua* la máxima preferencial PED-3 (1,791 µS/cm) en lluvias, por la falta de información en ARC-C4; en cambio, *D. thermaloides* mostró una máxima en PED-1 (1,691 – 1,751 µS/cm) y PED-4 (1,736.28 µS/cm). Contrario a lo analizado, la especie *A. exigua* fue asociada a aguas de baja temperatura, bien oxigenada y baja turbidez, así como una preferencia por la alcalinidad con bajos niveles de conductividad y pH cercano a 7 (Céspedes-Vargas et al., 2016).

Gomphonema sp. se encuentra presente en los manantiales de los sectores Centro y Oeste, con mayor abundancia en ACR-C2, MOL y RAS. Los valores de temperatura oscilan entre 39.1 y 44.1 °C con una mayor abundancia a temperaturas que rondan los ~40 °C, con niveles de fluoruro (F^-) de 11.82 mg/L y Nitratos (NO_3^-) de 110.73 mg/L, relacionados a ARC-C2 durante las lluvias, asimismo, en estiaje se identificaron formas teratológicas posiblemente asociadas a contaminación antrópica.

Anomoeoneis sphaerophora, al igual que *Gomphonema sp.*, se encuentra presente en los manantiales termales de los sectores Centro y Oeste en ambas temporadas, con mayor abundancia en los sitios MOL y ARC-C2. Las temperaturas presentes oscilan entre 39.5 y 44.4 °C y las concentraciones de fluoruros son ligeramente altas. La especie es reconocida como cosmopolita, asociada a un pH alcalino con niveles elevados de STD (Krammer & Lange-Bertalot, 1986).

Achnanthidium aff. minutissimum es una especie cosmopolita asociada a altas concentraciones de Oxígeno en aguas alcalinas e indiferente a concentraciones de Ca^{2+} y Fe, sensible a la contaminación y asociada a ambientes sombreados (Andrade-Servín & Israde-Alcántara, 2021). En Perú, la presencia de esta especie demostró ser indiferente a la salinidad, al pH y asociada con ecosistemas con contaminación orgánica (Guzman & Leiva, 2017). La especie fue observada en la mayoría de los manantiales, dominando en PED-2 con temperatura de 68 °C en estiaje y en CAR en ambas temporadas, las temperaturas van de 22 a 26.4 °C, valores bajos de CE (225.1 a 648.51 µS/cm) y STD (120 a 420 ppm).

Achnanthidium minutissimum presentó una abundancia bastante marcada en el manantial Carano asociada a contaminación antrópica, fue observada en un manantial con temperaturas que van desde 68 °C en estiaje hasta 60.1 °C en lluvias, en el cual su presencia es interpretada como resultado de un posible transporte pasivo de alguna fuente subterránea cercana con una fuerte presencia de esta especie, asociado al proceso de infiltración y mezcla de aguas. Aunque Leira et al. (2017) mencionan que es una especie indiferente a la temperatura, distribuida por toda Europa en manantiales alcalinos, con poca resistencia a la contaminación en los manantiales de Gallegos.

El sitio ARC-R (río) correspondiente al sector Este, durante el estiaje, mostró la dominancia local de *Cocconeis placentula*, especie moderadamente tolerante a la eutrofización (Lobo et al., 2019), considerada como eurihalina y ticoplanctónica, reconocida en ambientes salinos (Angel et al., 2018),

asociada con aguas cálidas, poco oxigenadas y con alta turbidez, considerada como una especie altamente tolerante a la contaminación (Céspedes-Vargas et al., 2016). En contraste, la comunidad de diatomeas presentó una estructura más equitativa en la temporada de lluvias, observándose una considerable presencia de la especie *Nitzschia aff. palea*, en conjunto, con un ligero aumento de SO_4^{2-} . Esta especie está relacionada a contaminación derivada del impacto humano (Pardhi et al., 2023). Asimismo, se observó presente a bajas concentraciones de fósforo y altas concentraciones de nitrógeno (Guzman Valqui & Leiva Tafur, 2017). También está presente en la Caldera de Acoculco en ambientes con condiciones ácidas (Israde-Alcántara et al., 2023).

Las temperaturas presentes en el río (ARC-R) van desde 14.7 hasta 20.1 °C, con concentraciones de STD (320 – 570 ppm) y CE bajas (252.03 – 696 $\mu\text{S}/\text{cm}$), similares al manantial Carano (CAR), aunado a esto, se observaron concentraciones altas de K^+ (19.64 – 24.26 mg/L).

El manantial ARC-L (sector Este) exhibe un cambio químico en su composición durante las lluvias. Este cambio se vio reflejado en la comunidad biológica, siendo dominado localmente por *Nitzschia vitrea* var. *salinarum* especie cosmopolita, nombrada por Hustedt como guía de aguas saladas subterráneas (Krammer & Lange-Bertalot, 1997), acompañada de *A. exigua* durante el estiaje. En contraste con la temporada de lluvias, donde al igual que en el río la estructura de la comunidad fue ligeramente equitativa con una no tan marcada dominancia de *Navicula cryptotenella*, especie presente en aguas alcalinas (Cantoral-Uriza & Sanjurjo, 2008) y en ambientes lóticos y lénticos oligo a eutróficos, indicadora de aguas con contaminación orgánica y buena oxigenación (De Altura De Jujuy et al., 2011); *D. thermaloides* y *Nitzschia perminuta* es una especie asociada a concentraciones de electrolitos que van de bajos a medios (Kurt. Krammer & Lange-Bertalot, 1997).

La temperatura del manantial osciló entre 19 y 33.3 °C, la concentración de STD disminuyó ligeramente en estiaje con un rango entre 1,290 pmm y 900 pmm en lluvias, así como también, se observó un aporte considerable de SO_4^{2-} (124.56 mg/L), K^+ (5.25 mg/L) y Ca^{2+} (5.36 mg/L).

Pese a la baja presencia de *Rhopalodia gibberula* durante la temporada seca, su abundancia en los manantiales PED-4, CRIP-C, CRIP-M y JER-H es notoria en comparación con la temporada de lluvias, donde su presencia es más abundante en los manantiales termales de los sectores Noreste, Centro y Oeste, con altas temperaturas y ricos en minerales, en especial PED-5, que presenta una temperatura de 51.7 °C. Es una especie indicadora de baja energía, poca profundidad, tolerante a la salinidad y contaminación orgánica (De León Velázquez et al., 2021). Esta especie fue vista en la sinterización de la Cuenca Superior de un géiser del parque Yellowstone, Estados Unidos, donde es asociada a suelos húmedos poco profundos, en entornos de conductividad baja a moderada con crecimiento en entornos con bajos contenidos de nitrógeno (Brown et al., 2019).

Adicionalmente, *Craticula accomoda* está presente en los manantiales termales del sector Central y algunos del sector Noreste (PED-4 y PED-5) en ambas temporadas caracterizados por sus altas temperaturas y sus concentraciones salinas, las especies del género *Craticula*, son especies bentónicas, típicas de aguas salobres, salinas o muy contaminadas, algunas especies son consideradas tolerantes a la eutrofización (Blanco et al., 2019).

Los índices de diversidad y riqueza mostrados en la Tabla 9 reflejan la estructura y estabilidad de la comunidad diatomológica, permitiendo inferir el grado de heterogeneidad ambiental.

Durante la temporada de estiaje, la estructura y representación de las diatomeas mostró un total de 408 taxa. El sitio con mayor diversidad fue PED-5 con 38 taxa y el más bajo en abundancia fue el manantial ARC-C2 con 8 taxa. Las especies *D. thermaloides*, *A. exigua*, *A. minutissimum*, *Tryblionella granulata*, *C. accomoda*, *N. cryptotenella*, *Gomphonema sp.*, *Nitzschia fonticola* fueron las especies más frecuentes (Fig. 39a).

Por otro lado, la temporada de lluvias presentó 340 taxa, con el sitio ARC-R como el más diverso (28 taxones), mientras que MOL presentó una baja diversidad con 10 taxones. Las especies más frecuentes fueron *D. thermaloides*, *A. exigua*, *A. minutissimum*, *N. cryptotenella*, *Gomphonema sp.*, *A. sphaerophora*, *T. granulata*, *C. placentula*, *C. accomoda* y *R. gibberula*.

Los índices de Shannon y la equitatividad de Pielou, mostraron los valores más altos en los sitios ACR-L, PED-1, PED-3, PED-5, ACR-C3, CRIP-C, CRIP-M, JER-B y JER-H durante el estiaje. En cambio, en la temporada de lluvias los manantiales con valores altos fueron ACR-L, ACR-R, ACR-3, RAS, JER-B y JER-H, esto significa que la mayoría de las comunidades de diatomeas son heterogéneas en estos sitios (Israde-Alcántara et al., 2023).

El índice de Simpson muestra que, durante la temporada seca, los sitios ACR-C2 y CAR están relacionados a una dominancia más fuerte, afines a la presencia de *Gomphonema sp.* y *A. minutissimum*; durante la temporada de lluvias, por el contrario, se vio favorecida en un aumento de diversidad algal. Al comparar los valores más altos del índice de Simpson con los índices de Shannon y de equitatividad, se presenta una correlación favorable. Por su lado, el índice de Margalef empleado por Israde-Alcántara et al. (2023) como estimador de la biodiversidad de la comunidad diatomológica, explica que valores por debajo de 2.0 indican que la biodiversidad es baja y está relacionada con contaminación atrófica, mientras que valores iguales o superiores a 5 hablan sobre una alta biodiversidad, así, el sitio ACR-C2 presenta una baja biodiversidad (0.976), en contraste con PED-5 que muestra una mejor biodiversidad (5.166) durante el estiaje, en lluvias el sitio MOL tiene baja biodiversidad (1.692) sin presentar valores iguales o mayores a 5.

4.5 Relación diatomeas-variables ambientales

En los análisis exploratorios se puede observar la afinidad de las especies dominantes *Denticula thermaloides*, *Achnanthes exigua* y *Gomphonema sp.* a valores altos de CE y STD. Estas concentraciones de mineralización y salinidad explican el 60.7% de la varianza total del sistema termal (Fig. 34), vinculado a la facie hidrogeoquímica Na-Cl vista en los diagramas de Stiff y Piper.

En concordancia con los análisis exploratorios, el Análisis de Correspondencia Canónica (Fig. 43) muestra la relación de *D. thermaloides* a altos valores de T y STD, junto con las especies *A. exigua*, *Rhopalodia acuminata*, *Rhopalodia gibberula*, *Tryblionella granulata* y *Craticula accomoda* en ambas temporadas. No obstante, se observa un ligero cambio de preferencia de la especie *A. exigua*, en lluvias, hacia un pH más alcalino. Similarmente, las especies *Anomoeoneis sphaerophora*, *R. acuminata* y *R. gibberula* son asociadas a altas concentraciones de Na⁺, en cambio, las especies *C. accomoda*, *T. granulata*, *D. thermaloides* y *A. exigua* exhiben una afinidad por altas concentraciones de Cl⁻ y F⁻, como se aprecia en la Figura 44.

Adicionalmente, este conjunto de especies fue asociado a altas concentraciones de B y As, en conjunto con la especie *Nitzschia vitrea* var. *salinarum* durante el periodo seco (Fig. 45). Las altas

concentraciones de estos elementos traza, están vinculadas con el entorno geotérmico de la zona, acompañadas de elementos geogenéticos como F^- y Li^+ .

Asimismo, dicho conjunto muestra un patrón comparable al del *Grupo IV* del mapa de calor correspondiente a la temporada de lluvias, asociado a las manifestaciones termales del sector Noreste (PED-3, PED-4 y PED-5) y los sectores Centro y Oeste (ARC-C1, ARC-C3, ARC-C4, RAS, CRIP-M, CRIP-C y JER-H), los cuales, representan la influencia hidrotermal en la Cabecera Municipal de Puruándiro.

Por su parte, en la temporada de lluvias, la especie *R. gibberula* mantiene su preferencia por concentraciones de As, a diferencia de las especies *D. thermaloides* y *T. granulata* que evidenciaron un cambio de afinidad, a altas concentraciones de Mn. En tanto que *Navicula cryptotenella*, *A. exigua*, *Cocconeis placentula* y *Nitzschia perminuta* presentaron una relación con el Fe.

La especie *Nitzschia perminuta* está vinculada a un pH más alcalino, así como a la presencia de Ba y la correlación de Mg^{2+} y Ca^{+2} . Al ser una especie ligeramente abundante en los manantiales ACR-L y JER-B pertenecientes al *Grupo I* de la *Figura 41*, presentan un notorio cambio en la temperatura entre ambas temporadas, con una ligera tendencia a altas concentraciones de Ca^{+2} , Mg^{2+} y K^+ , así como de HCO_3^- y SO_4^{2-} . Aunque esta especie no es localmente abundante, su presencia permite establecer una relación con las condiciones ambientales presentes en ARC-L durante las lluvias.

Las especies *Gomphonema sp.* y *Nitzschia fonticola* fueron asociadas con altas concentraciones de Manganeseo (Mn) durante el estiaje. En contraste con las lluvias, las especies mostraron una afinidad diferente: *Gomphonema sp.* a concentraciones de Br^- , mientras que *N. fonticola* se orienta al vector de la alcalinidad ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$), sugiriendo una tolerancia a ambientes con mayor mineralización.

Cocconeis placentula mostró afinidad por concentraciones de Mg^{2+} con un valor de 11.24 mg/L, registrada en el río durante el periodo de lluvias; sin embargo, su mayor abundancia es en estiaje, pese a registrarse concentraciones superiores a los ~14 mg/L, lo que sugiere que su distribución no responde exclusivamente a este ión, sino a la interacción con otros parámetros como Al y K^+ , indicando un rango de tolerancia amplio.

Por último, *D. thermaloides*, *Gomphonema sp.*, *R. gibberula*, *A. sphaerophora* y *Achnanthydium minutissimum* están relacionadas a altas concentraciones de nitratos (NO_3^-) en lluvias, compuesto químico derivado de la actividad humana, en específico debido al uso de fertilizantes en el manantial CAR, con el propósito de potenciar la productividad de los cultivos con contenidos altos en nutrientes, materia orgánica parcialmente degradada, nitratos, amoníaco y aminoácidos que afectan en gran medida la calidad del agua (Israde-Alcántara et al., 2023).

La preferencia única de las especies en la temporada lluvias, está asociada a un estado de sucesión temprana, donde las especies no alcanzan una comunidad estable (Angel et al., 2018).

Capítulo 5. Conclusiones

Puruándiro resultó ser un laboratorio natural que, por la concentración de manantiales en una zona pequeña y la actividad humana, igualmente concentrada en una zona restringida, permite distinguir las contribuciones naturales y geotérmicas, así como los impactos antrópicos en sus aguas. La integración de análisis fisicoquímicos y de diatomeas de un conjunto de manantiales termales reveló que tanto la composición química del agua como la estructura de la comunidad de diatomeas, están significativamente relacionadas durante las temporadas de estiaje y lluvias.

Las manifestaciones termales de la Cabecera Municipal de Puruándiro exhibieron una gran asociación con la salinidad y mineralización por los valores altos de CE y STD por procesos de interacción agua-roca y procesos de mezcla, debido a la presencia de Na^+ , Cl^- y HCO_3^- . Las altas concentraciones de Na^+ y Cl^- están estrechamente relacionadas con el posible reservorio geotérmico, ya que estas aumentan a altas temperaturas. Aunado a esto, las manifestaciones termales y el río no se vieron influenciados por el cambio estacional; del mismo modo, la comunidad dominante de diatomeas. El aumento de CE en el río (ARC-R) (252.03 – 696 $\mu\text{S}/\text{cm}$) señala la importancia de la contribución del sistema hidrológico.

Las asociaciones de diatomeas analizadas durante la temporada de estiaje muestran una mejor relación con los parámetros ambientales medidos respecto a la temporada de lluvias, puesto que se observa una mejor distribución de las especies. Las diatomeas evidenciaron una comunidad heterogénea y equilibrada, con un grado de diversidad medio debido al termalismo.

La comunidad dominante que representó las manifestaciones termales durante ambas temporadas está conformada por *Achnanthes exigua*, *Denticula thermaloides* y *Gomphonema sp.* asociadas a un alto grado de salinidad con el aumento de la temperatura, característico de zonas hidrotermales, por lo que su presencia podría estar estrechamente asociada a la indicación de este tipo de ambientes. Similarmente, las especies subdominantes asociadas a estas condiciones termales fueron *Anomoeoneis sphaerophora*, *Tryblionella granulata*, *Rhopalodia acuminata*, *R. gibberula* y *Craticula accomoda*.

La contribución de las actividades humanas en la región, en cuanto a la presencia de Nitratos (NO_3^-), es bastante notoria y preocupante. Carano es un lugar de remanso en medio de una zona de cultivos, limitado por un gran sauce, aislado de la población, destacado por su belleza natural. El sitio manifestó una contribución por desechos de agroquímicos cercanos a los 70 mg/L en estiaje sin detectarse ningún otro aporte antrópico. Bajo este enfoque, la zona de los manantiales naturales, correspondientes al sector Central, donde las actividades de balneología, posible pastoreo o aguas residuales domésticas se encuentran presentes o colindando con el sitio y son relacionadas a la presencia tan alta de este contaminante con valores de 69.95 a 246.33 mg/L en lluvias.

Considerando lo anterior, la presencia de la actividad hidrotermal, representada por las altas concentraciones de arsénico (As) en los manantiales termales, destacan los niveles elevados en JER-H (0.178 mg/L) y JER-M (0.175 mg/L), ubicados dentro de la colonia Jeroche con usos domésticos, donde sus concentraciones sobrepasan los límites permisibles y recomendados para el uso y consumo humano de la NOM-127-SSA1-2021 y OMS (2011). Por ello, es necesario instar a las

autoridades pertinentes de la cabecera municipal de Puruándiro a regular y monitorear las concentraciones de estos contaminantes con alto grado de afección a periodos de exposición largos.

La correlación entre especies y parámetros permite establecer bioindicadores específicos:

Alta temperatura y salinidad: *Achnanthes exigua* y *D. thermaloides*

Nitratos (NO_3^-): *Achnanthidium minutissimum*

Magnesio (Mg^{2+}) y Calcio (Ca^{+2}): *Nitzschia perminuta*

Arsénico (As) y Boro (B): *Rhopalodia gibberula*, *Craticula accomoda* y *Tryblionella graulata*

Sodio (Na^+) y Cloro (Cl^-): *Achnanthes exigua*, *Denticula thermaloides*, *Rhopalodia gibberula*, *Tryblionella granulata*, *Craticula accomoda*, *Rhopaloida acuminata* y *Anomoeoneis sphaerophora*.

La comunidad de diatomeas demostró ser un bioindicador sensible y confiable para calidad de agua, termalismo y aportes antropogénicos. Destacando la importancia de integrar herramientas químicas y biológicas para una evaluación ambiental más completa, donde las diatomeas pueden actuar como una herramienta de monitoreo ambiental eficaz y de bajo costo, capaces de reflejar tanto condiciones naturales como impactos antrópicos.

Bibliografía

- Andrade-Servín, A. G., & Israde-Alcántara, I. (2021). Riqueza y distribución de las diatomeas epilíticas indicadoras de contaminación en el río Angulo afluente del río Lerma, México. *HIDROBIOLOGÍA*, 31(1), 43–52.
<https://doi.org/10.24275/UAM/IZT/DCBS/HIDRO/2021V31N1/ANDRADE>
- Angel, A., Vila, I., Díaz, C., Molina, X., Sepúlveda, P., Angel, A., Vila, I., Díaz, C., Molina, X., & Sepúlveda, P. (2018). Geothermal Diatoms: Seasonal Variability in the El Tatio Geothermal Field (Altiplano, Chile). *Advances in Microbiology*, 8(3), 211–234.
<https://doi.org/10.4236/AM.2018.83015>
- Bakker, J. D. (2026). *Applied Multivariate Statistics in R*. University of Washington.
<https://uw.pressbooks.pub/appliedmultivariatestatistics/>
- Bargu, S., Smith, E., & Ozhan, K. (2011). The Diatom World. En J. Seckbach & J. P. Kociolek (Eds.), *The Diatom World* (Vol. 19, Número 1998). Springer . <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1327-7>
- Bezaury Creel, J. E., Ochoa Pineda, F., Llano Blanco, M. O., Lasch Thaler, C., Herron, C., Vázquez Castañeda, D., Hernández Yañez, A., & Hernández Ruiz, F. (2017). Agua dulce: conservación de la biodiversidad, protección de los servicios ambientales y restauración ecológica en México. *The nature Conservancy*.
- Blanco, S., Olenici, A., Ortega, F., Jiménez-Gómez, F., & Guerrero, F. (2019). Taxonomía y morfología del *Craticula gadorensis* sp. nov. (Bacillariophyta, Stauroneidaceae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 54(1), 5–11.
https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-23722019000100001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Brown, S. R., Fritz, S. C., Morgan, L. A., & Shanks, W. C. (2019). Fossilized diatoms of siliceous hydrothermal deposits in Yellowstone National Park, USA. *Diatom Research*, 34(4), 193–204. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2019.1698466>
- Camargo Cruz, T., Núñez Benítez, J., & Ángeles Hernández, J. G. (2022a). Aguas termales del estado de Hidalgo. D.R. © Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
<https://doi.org/10.29057/BOOKS.100>
- Cantoral-Uriza, E. A., & Sanjurjo, M. A. (2008). Diatoms (Bacillariophyceae) from Marjal Oliva-Pego (Valencian Community, Spain). *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 65(1), 111–128. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2008.v65.i1.249>
- Castenholz, R. W. (1969). Thermophilic blue-green algae and the thermal environment. *Bacteriological reviews*, 33(4), 476–504. <https://doi.org/10.1128/MMBR.33.4.476-504.1969>
- Castillo-Ramírez, A. (2023). *Exploración geoquímica y geológica para la zona termal de Puruándiro, Michoacán* [Universidad Autónoma de México].

https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/VU34QKQCAFG5FYEILXFNHCDCMABT6FDX234X9M8TDM4VFRND4F-19383?func=direct&doc_number=000849750&format=999

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2011). *Atlas de riesgos naturales del Municipio de Puruándiro, Michoacán*.

http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr_16071_AR_PURUANDIRO.pdf

Céspedes-Vargas, E., Umaña-Villalobos, G., & Silva-Benavides, A. M. (2016). Tolerancia de diez especies de diatomeas (Bacillariophyceae) a los factores físico-químicos del agua en el Río Sarapiquí, Costa Rica. En *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN (Vol. 64, Número 1)*.

Connor, C. B. (1987). Structure of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33(1–3), 191–200.

[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90061-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90061-8)

Maidana, N. I., Seeligmann, C., & Morales, M. R. (2011). El género *Navicula* sensu stricto (Bacillariophyceae) en humedales de altura de Jujuy, Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 46(1–2), 13–29.

https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-23722011000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

De León Velázquez, D., Regina, M., Huerta, A., Jazel, H., Godínez Daniela, M., Arely, R. O., Samano, R., Irais, R., & Berenice, N. L. (2021). Descripción morfológica, distribución geográfica y aplicaciones potenciales de diferentes especies de diatomeas de la clase Bacillariophyceae: Artículo de revisión. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 10. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3381>

Demant, A. (1978). Características del eje Neovolcanico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2, 172–187.

<https://repositorio.unam.mx/contenidos/4120831>

Demant, A. (1981). Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano | Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 5(2), 217–222.

<https://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/1357>

Diario Oficial de la Federación. (2022, mayo 2). *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

Ellis A. J., & Mahon w. A.J. (1977). *Chemistry and Geothermal Systems*. . Academic Press.

Estradas-Romero, A., María Prol-Ledesma, R., & Zamudio-Resendiz, M. E. (2009). *Relación de las características geoquímicas de fluidos hidrotermales con la abundancia y riqueza de especies del fitoplancton de Bahía Concepción, Baja California Sur, México*. (1), 87–96.

- Fazlutdinova, A., Gabidullin, Y., Allaguvatova, R., & Gaysina, L. (2020). Diatoms in Kamchatka's Hot Spring Soils. *Diversity* 2020, Vol. 12, Page 435, 12(11), 435. <https://doi.org/10.3390/D12110435>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4th edition). Prentice Hall, Inc. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://hidrologia.usal.es/Complementos/Representar_Piper_y_Stiff.pdf
- Gamito, S. (2010). Caution is needed when applying Margalef diversity index. *Ecological Indicators*, 10(2), 550–551. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.07.006>
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 227–283. <https://doi.org/10.18268/BSGM2005V57N3A2>
- Gu, Z. (2022). Complex heatmap visualization. *iMeta*, 1(3). <https://doi.org/10.1002/IMT2.43;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION>
- Gurung, T., & Yangden, T. (2025). Ethnopharmacological knowledge and physicochemical properties of hot springs in Bhutan. *BMC Complementary Medicine and Therapies* 2025 25:1, 25(1), 393-. <https://doi.org/10.1186/s12906-025-05123-2>
- Guzman Valqui, B. K., & Leiva Tafur, D. (2017). Diatomeas como bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en la cuenca del río Utcubamba, Amazonas - Perú. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2(1), 16. <https://doi.org/10.25127/ucni.v2i1.220>
- Habit, E., Górski, K., Alò, D., Ascencio, E., Astorga, A., Colin, N., Contador, T., De los Ríos, P., Parra, Ó., Fierro, P., Dorador, C., Delgado, V., García, K., Quezada-Romegialli, C., Ried, B., Rivera, P., Soto-Azat, C., Valdovinos, C., Vera-Escalona, I., & Woelfl, S. (2019). Biodiversidad de ecosistemas de agua dulce. *Mesa biodiversidad-comité científico COP25*. https://www.researchgate.net/publication/339913107_Biodiversidad_de_ecosistemas_de_agua_dulce
- Hasenaka, T. (1994). Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63(1–2), 13–31. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90016-7)
- Ibarra-Olivares, G., Miranda-Avilés, R., Ramos-Leal, J. A., Morán-Ramírez, J., Puy-Alquiza, M. J., Li, Y., Ángeles-Moreno, E., & Kshirsagar, P. (2023). Hydrogeochemical Characterization of Groundwater at the Boundaries of Three Aquifers in Central México. *Water (Switzerland)*, 15(22), 3948. <https://doi.org/10.3390/w15223948>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Puruándiro Michoacán de Ocampo*. <http://mapserver.inegi.org.mx/mgn2k/>

- Israde-Alcántara, I., García-Zárate, M. A., & González-Acevedo, Z. I. (2023). Diatom assemblages from different environments of the Acoculco Caldera associated to hydrothermal and anthropogenic activity. *Environmental Monitoring and Assessment* 2023 195:4, 195(4), 501-. <https://doi.org/10.1007/S10661-023-11125-9>
- Jácome-Paz, M. P., Gómez Piña, V. M., Prol Ledesma, R. M., González Romo, I., Estrada Murillo, A., Hernández Hernández, M. A., González Alfaro, A., & Gómez Torres, M. (2021). Geoheritage in Thermal Springs of Puruándiro, Michoacán, México. *Geoheritage*, 13(3). <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00584-6>
- Jácome-Paz, M. P. (2019). Two new geothermal prospects in the Mexican Volcanic Belt: La Escalera and Agua Caliente – Tzitzio geothermal springs, Michoacán, México. *Geothermics*, 80, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.02.004>
- Krammer, K., & Lange-Bertalot, H. . (1986). *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd.2/1: Bacillariophyceae, Naviculaceae*. Gustav Fischer Verlag .
- Krammer, K. (Kurt), & Lange-Bertalot, H. (Horst). (1999). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Springer Spektrum. <https://www.springer.com/us/book/9783827408389>
- Krammer, K., & Lange-Bertalot, H. (1999). *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bd. 2/4: Bacillariophyceae* (1a ed.). Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Krammer, K., & Lange-Bertalot, Horst. (1997). *Susswasserflora von Mitteleuropa, Band 2/2: Bacillariophyceae. Teil 2, Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. Gustav Fischer Verlag Jena.
- Kumar Shukla, S., Singh Chaddha, A., Kumar, K., Sharma, A., Pandey, S. K., Kapur, V. V, Phartiyal, B., Shivam, A., Dabhi, A., & Bhushan, R. (2023). Hot spring diatoms are linked to extreme cold conditions: A new perspective for astrobiological implication from the sinter deposit of Puga hot spring, Ladakh, India. *Authorea Preprints*. <https://doi.org/10.22541/essoar.170158324.46307742/v1>
- Lai, G. G., Beauger, A., Wetzels, C. E., Padedda, B. M., Voldoire, O., Lugliè, A., Allain, E., & Ector, L. (2019). Diversity, ecology and distribution of benthic diatoms in thermo-mineral springs in Auvergne (France) and Sardinia (Italy). *PeerJ*, 7. <https://doi.org/10.7717/peerj.7238>
- Leira, M., Meijide-Failde, R., & Torres, E. (2017). Diatom communities in thermo-mineral springs of Galicia (NW Spain). *Diatom Research*, 32(1), 29–42. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2017.1286266;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Lobo, E. A., Freitas, N. W., & Salinas, V. H. (2019). Diatoms as bioindicators: Ecological aspects of the algae response to eutrophication in Latin America. *Mexican Journal of Biotechnology*, 4(1), 1–24. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2019.4.1.1>
- López-Sandoval, Ó., Montejano, G., Carmona, J., Cantoral, E., & Becerra-Absalón, I. (2016). Diversidad algal de un ambiente extremo: el manantial geotermal Los Hervideros,

- México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/J.RMB.2016.01.004>
- Lowe, R. (s/f). *Guide to Discostella | Genera - Diatoms of North America*. Recuperado el 2 de diciembre de 2025, de <https://diatoms.org/genera/discostella/guide>
- Magurran, A. E. (1988). Ecological Diversity and Its Measurement. En *Ecological Diversity and Its Measurement* (1st edition). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7358-0>
- Margoshes, M., & Scribner, B. F. (1970). ICP Emission Spectrometry A Practical Guide. *Analytical Chemistry*, 42(5), 398–417.
- Martínez-Florentino, T. A. K., Esteller-Alberich, M. V., Expósito, J. L., Domínguez-Mariani, E., & Morales-Arredondo, J. I. (2021). Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal springs in the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geothermics*, 96, 102176.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102176>
- Morales-Arredondo, J. I., Esteller-Alberich, M. V., Armienta Hernández, M. A., & Martínez-Florentino, T. A. K. (2018). Characterizing the hydrogeochemistry of two low-temperature thermal systems in Central Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 185, 93–104.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.006>
- Nikulina, T. V., Kalitina, E. G., Kharitonova, N. A., Chelnokov, G. A., Vakh, E. A., & Grishchenko, O. V. (2019). Diatoms from Hot Springs of the Kamchatka Peninsula (Russia). *Diatoms: Fundamentals and Applications*, 311–333.
<https://doi.org/10.1002/9781119370741.CH14>
- Nikulina, T. V., & Kociolek, J. P. (2011). *Diatoms from Hot Springs from Kuril and Sakhalin Islands (Far East, Russia)*. 333–363. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1327-7_15
- Oliart-Ros, R. M., Manresa Presas, Á., & Sánchez Otero, M. G. (2016). Utilización de microorganismos de ambientes extremos y sus productos en el desarrollo biotecnológico. *Ciencia UAT*, 11(1).
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582016000200079
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. *Organización Mundial de la Salud*, 4, 636. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1> (accessed 12 September 2024)
- Owen, R. B., Renaut, R. W., & Jones, B. (2008). Geothermal diatoms: A comparative study of floras in hot spring systems of Iceland, New Zealand, and Kenya. *Hydrobiologia*, 610(1), 175–192. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9432-y>
- Palacios, R. A. (2024, enero). *Calidad del Agua y Contaminación por mercurio en la microcuenca Río Calderas: Aportes de la MAPE de oro, en El Corpus-Choluteca*.
https://www.researchgate.net/publication/383495184_Calidad_del_Agua_y_Contamina

cion_por_mercurio_en_la_microcuenca_Rio_Calderas_Aportes_de_la_MAPE_de_oro_en_El_Corpus-Choluteca

- Pantoja Alor, J., & Gómez Caballero, J. A. (2004). Los sistemas hidrotermales y el origen de la vida - Revista Ciencias. *Revista ciencias* 75, 12–22.
<https://www.revistacienciasunam.com/es/busqueda/titulo/78-revistas/revista-ciencias-75/631-los-sistemas-hidrotermales-y-el-origen-de-la-vida.html>
- Pardhi, S., Kokila, T., Thacker, M., Alakananda, B., & Karthick, B. (2023). Diatoms (Bacillariophyta) of the world's highest aquatic environments from the Western Himalayas, India. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 52(2), 172–205.
<https://doi.org/10.26881/oahs-2023.2.04>
- Pesce, A. H., & Miranda, F. (2003). *Catálogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina. Volumen I, Región Noroeste. Provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, La Rioja y San Juan*.
<https://repositorio.segemar.gov.ar//handle/308849217/2424>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914–928.
<https://doi.org/10.1029/TR025I006P00914;WEBSITE:WEBSITE:AGUPUBS;JOURNAL:JOURNAL:23249250A;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Pirajno, F. (2020). Subaerial hot springs and near-surface hydrothermal mineral systems past and present, and possible extraterrestrial analogues. *Geoscience Frontiers*, 11(5), 1549–1569. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2020.04.001>
- Prol-Ledesma, R. M. (1999). El calor de la Tierra. *La ciencia para todos*, 58.
- Pumas, C., Pruetiworanan, S., & Peerapornpisal, Y. (2018). Diatom diversity in some hot springs of northern Thailand. *Botanica*, 24(1), 69–86. <https://doi.org/10.2478/BOTLIT-2018-0007>
- Puy-Alquiza, M. J., Luna, B. N., Miranda-Aviles, R., Hernández, Ma. M. S., & Aguilera, G. C. (2021). Diatom of the Bacillariophyceae Class in Thermophilic Microbial Mats Present in Sulphurous Hot Springs and their Possible Biotechnological Application. *Global Journal of Earth Science and Engineering*, 8, 80–96. <https://doi.org/10.15377/2409-5710.2021.08.7>
- Ramírez Durán, N., Sandoval Trujillo, H., & Batista García, R. (2021). *Microorganismos: La vida en ambientes extremos* (1a ed.).
- Rivera, P., Cruces, F., Rivera, P., & Cruces, F. (2018). Achnanthidium exiguum (Bacillariophyta): nuevas citas para localidades andinas del norte de Chile. *Gayana. Botánica*, 75(2), 646–649. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432018000200646>
- Rojas Jiménez, K. (2022). *Ciencia de Datos para Ciencias Naturales*. Bookdown, R package.
https://bookdown.org/keilor_rojas/CienciaDatos/#c%C3%B3mo-citar-este-libro

- Rothschild, L. J., & Mancinelli, R. L. (2001). Life in extreme environments. *Nature* 2001 409:6823, 409(6823), 1092–1101. <https://doi.org/10.1038/35059215>
- Round, F. E., Crawford, R. M., & Mann, D. G. (1990). *Diatoms: Biology and Morphology of the Genera* (1a ed.). Cambridge University Press.
- Rumeau, A., & Coste, M. (1988). Initiation à la systématique des diatomées d'eau douce. Pour l'utilisation pratique d'un indice diatomique générique. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 309(309), 1–69. <https://doi.org/10.1051/KMAE:1988009>
- Spaulding, S. A., Potapova, M. G., Bishop, I. W., Lee, S. S., Gasperak, T. S., Jovanoska, E., Furey, P. C., & Edlund, M. B. (2021). Diatoms.org: supporting taxonomists, connecting communities. *Diatom Research*, 36(4), 291–304. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2021.2006790>
- Stiff, H. A. (1951). The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 15–3. <https://doi.org/10.2118/951376-G>
- Stoermer, E. F., & Smol, J. P. (1999). *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences* (J. P. Smol & E. F. Stoermer, Eds.; 2nd Edition). Cambridge.
- Stumm W., & Morgan J.J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. John Wiley & Sons.
- Teramoto, E. H., & Chang, H. K. (2020). Assessment of natural groundwater salinization processes in the eastern portion of the Cachoeira River Basin, Bahia. *Revista do Instituto Geológico*, 41(2), 15–32. <https://doi.org/10.33958/revig.v41i2.680>
- Toth, A., & Bobok, E. (2016). Flow and Heat Transfer in Geothermal Systems: Basic Equations for Describing and Modelling Geothermal Phenomena and Technologies. *Flow and Heat Transfer in Geothermal Systems*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13065-6>
- Trujillo, E., Fonseca, G., García, M. A., & Martínez, V. (2009). Evaluación de la Cromatografía Iónica para Fomentar su Uso en la Investigación y Estudios de Posgrado en Ciencias del Agua. *Formación universitaria*, 2(1), 7–16. <https://doi.org/10.4067/s0718-50062009000100003>
- Van de Vijver, B., & Cocquyt, C. (2009). Four new diatom species from la calera hot spring in the peruvian andes (colca canyon). *Diatom Research*, 24(1), 209–223. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2009.9705792>
- Wehr, J. D., Sheath, R. G., & Kociolek, J. P. (2015). Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification. En *Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification* (2nd Edition). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66664-8>
- Wohletz, K., & Grant, H. (1992). *Volcanology and Geothermal Energy*. Berkeley: University of California Press. <https://publishing.cdlib.org/ucpressebooks/view?docId=ft6v19p151;chunk.id=0;doc.view=print>

- Younger, P. L. (2007). *Groundwater in the Environment : an Introduction*. Wiley-Blackwell publishing.
https://pocketbook.de/en/downloadable/download/sample/sample_id/5792492/?bookId=MTUzOTQ0MjM=
- Zhou, X., Zhuo, L., Wu, Y., Tao, G., Ma, J., Jiang, Z., Sui, L., Wang, Y., Wang, C., & Cui, J. (2023). Origin of some hot springs as conceptual geothermal models. *Journal of Hydrology*, 624, 129927. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129927>

Anexos

Los datos de abundancia de diatomeas, fotografías de campo y material complementario pueden consultarse mediante el siguiente código QR.

