



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Efecto del gradiente de temperatura en la distribución de algas en un manantial termal en la Región Central de México.

TESIS
QUE PARA OBTENER EL
TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA:

OSCAR ALBERTO LÓPEZ SANDOVAL



Director de tesis: DR. GUSTAVO ALBERTO MONTEJANO
ZURITA

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de Datos del Jurado

1.	Datos del alumno López Sandoval Oscar Alberto 54 46 10 12 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Biología 097414395
2.	Datos del tutor Dr Gustavo Alberto Montejano Zurita
3.	Datos del sinodal 1 Dr Javier Carmona Jiménez
4.	Datos del sinodal 2 Dr Enrique Arturo Cantoral Uriza
5.	Datos del sinodal 3 Dr Hilda Patricia León Tejera
6.	Datos del sinodal 4 M en C Jenny Paola Beltrán Magos
7.	Datos del trabajo escrito Efecto del gradiente de temperatura en la distribución de algas en un manantial termal en la Región Central de México 55 p 2006

Agradecimientos

Al Dr. Gustavo Montejano Zurita por apoyarme durante la realización de este trabajo, por compartir su conocimiento y experiencia y especialmente por su dedicación.

Al Dr. Javier Carmona por su apoyo en el trabajo de campo, en el laboratorio y por sus sugerencias a lo largo de la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Enrique Cantoral por su ayuda en el trabajo de laboratorio y en la revisión de mi tesis.

A la Dra. Hilda León y a la M. en C. Jenny Beltrán por la revisión de este manuscrito y sus comentarios, que fueron muy valiosos para el resultado final de esta tesis.

A Karina por su compañía y apoyo en el arduo trabajo de campo.

A la Biol. Mariana Cartagena por apoyarme en la traducción de la literatura del alemán al español.

A todos los compañeros que conforman el Laboratorio de Fisiología, además de los ya mencionados, Itzel, Rocío, Miriam, Rosa Luz, Eberto, Norma y Víctor, por aguantar mis travesuras desde mi llegada a este laboratorio.

A Itzel con mucho cariño por brindarme su amor y apoyo incondicional, conocimiento y experiencia, que fue una parte muy importante para la culminación de mi trabajo.

A mis padres y mis hermanos con mucho cariño, por brindarme su apoyo a lo largo de mi vida, ya que todas mis metas alcanzadas hasta ahora no hubieran sido posibles sin ellos.

A mi Chiquirilita, con quien puedo contar en todo momento y me ayuda a darle dirección a mi vida.

A mis hermanas académicas, Rocío y Mariana, con quien he compartido momentos muy gratos.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
Características físicas y químicas de los ambientes termales	5
Adaptaciones de la biota de ambientes termales	5
Adaptación a la temperatura	5
Adaptación al pH	7
Adaptación a la salinidad	7
Productores primarios de los manantiales termales	8
Algas	9
OBJETIVO	12
ÁREA DE ESTUDIO	12
ANTECEDENTES	19
MATERIAL Y MÉTODO	20
RESULTADOS	21
Ecología y distribución	21
Análisis de diversidad	21
Descripción de especies	27
Clase Bacillariophyceae	27
Clase Cyanophyceae	33

Clase Chlorophyceae	37
DISCUSIÓN	45
CONCLUSIONES	49
LITERATURA CITADA	50
ANEXO I. Gelatina Glicerinada	53
ANEXO II. Limpieza de Diatomeas	54
ANEXO III. Relación especie/muestra	55

RESUMEN

En el presente trabajo se describen la diversidad algal presente en el manantial termal Los Hervideros en el estado de Michoacán, México y su distribución en relación a los gradientes de temperatura. Este manantial forma parte del sistema hidrotermal Los Azufres afectado por la actividad volcánica del Eje Volcánico Transversal. La temperatura registrada en estos manantiales oscila entre los 22.2 y 85.2° C. La conductividad es alta (3400 a 4430 $\mu\text{S cm}^{-1}$) mientras que el pH es ligeramente alcalino con valores de entre 7.5 a 8.0. Entre las especies que dominaron los crecimientos visibles se encuentran: *Phormidium boryanum*, *Synechococcus* sp., *Synechocystis* sp. en temperaturas de 47 – 83° C, 55 – 76° C y 22 – 83° C, respectivamente. En cuanto a las diatomeas se registró a *Achnanthes exigua* (22 – 55° C), *Amphora veneta* (47 – 55° C), *Anomoeoneis costata* (30 - 47° C), *Diploneis elliptica* (30 – 55° C) y *Pinnularia viridis* (30 - 47° C). Asimismo fue registrada la presencia de *Oedogonium* sp. (30 – 35° C). Este manantial se caracteriza por presentar cambios drásticos de temperatura en pocos centímetros, lo cual se ve reflejado en una distribución heterogénea de las especies algales.

Palabras clave:

Algas, diatomeas, cianofitas, clorofitas, manantial termal, taxonomía y temperatura.

INTRODUCCIÓN

Características físicas y químicas de los ambientes termales

Se considera que los manantiales termales son cuerpos de agua en los que la temperatura del agua está por arriba de la temperatura ambiental media anual de la región. Sin embargo dentro de esta definición la temperatura puede variar considerablemente dependiendo de la latitud en que se presenten y la actividad ígnea de la región. Por lo general en los trabajos en que se hacen referencia a estos ambientes, se considera manantiales termales a aquellos en los que la temperatura esta relacionada con la actividad volcánica y cuyas temperaturas pueden ser cercanas o alcanzar el punto de ebullición (v.gr. Copeland). Por lo general presentan una baja diversidad biológica (Graham, 2000).

Según Brock (1978) el pH de los manantiales termales puede tener un valor altamente ácido de 2 a muy básico con valores de hasta 10. La distribución de los valores generalmente es bimodal, con ambientes ácidos dominados por sulfatos, ambientes básicos dominados por carbonatos o silicatos y existen pocos ambientes neutros.

Adaptaciones de la biota de ambientes termales

Adaptación a la temperatura

La temperatura es uno de los factores ambientales más importantes y limitantes que afectan el crecimiento y supervivencia de los organismos. La temperatura puede afectar de dos maneras opuestas, una es acelerando las reacciones metabólicas de los organismos, dando como resultado un crecimiento más rápido y, la otra es negativa, provocando que las proteínas, ácidos nucleicos y otros componentes celulares, sensibles a la temperatura, sufran daño y se inactiven irreversiblemente (Brock, 1974).

Todos los organismos tienen una temperatura óptima en la cual presentan la mayor tasa de crecimiento y reproducción. También poseen una temperatura mínima, en la cual por debajo de ésta son metabólicamente inactivos y, una temperatura máxima en la que por encima de ésta les resulta imposible crecer y, por lo tanto, reproducirse (Atlas & Bartha, 2002).

El intervalo de tolerancia a la temperatura de los organismos puede ser estrecho o amplio. Se determina *estenotermales* a aquellos organismos que tienen un intervalo estrecho y generalmente se encuentran en lugares donde ésta se mantiene constante y; los organismos *euriotermales* son los que tienen un intervalo amplio y se encuentran generalmente en lugares donde la temperatura es muy variable (Brock, 1974).

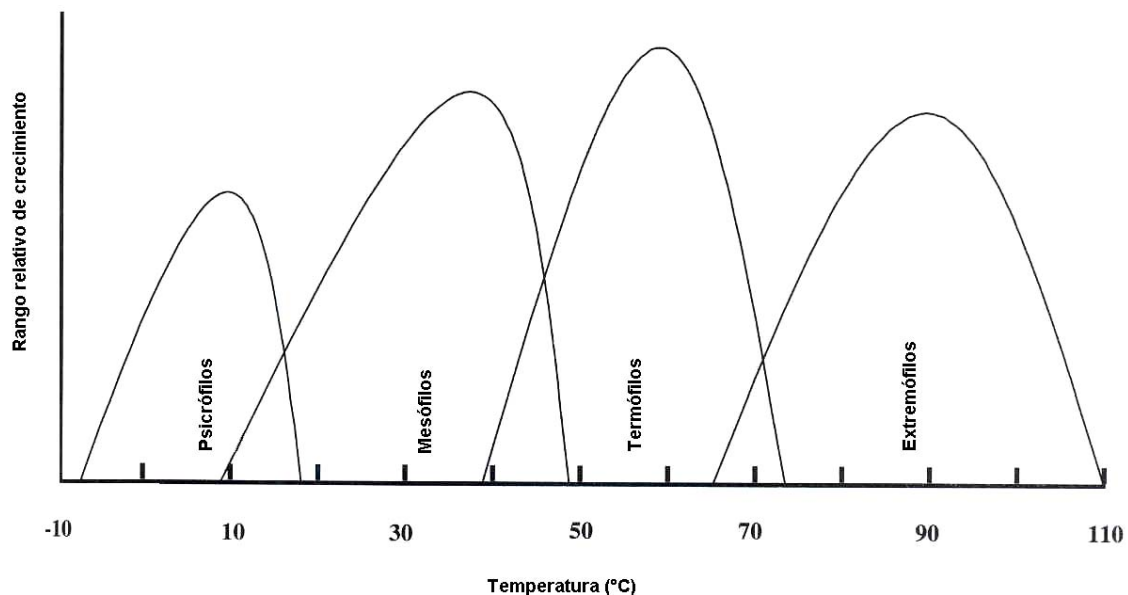


Fig. 1. Los organismos están categorizados como psicrófilos, mesófilos o termófilos. Algunos termófilos, particularmente del dominio Archaea, crecen óptimamente en temperaturas extremadamente altas (ej. Extremófilos) (Jjemba, 2004).

Jjemba (2004) clasifica a los microorganismos basándose en el intervalo de temperatura que pueden tolerar: psicrófilos (-7 a 18 °C), mesófilos (9 a 48 °C), termófilos (39 a 73 °C) y extremófilos (65 a 110 °C) (Fig.1, tomado de Jjemba, 2004).

Adaptación al pH

Varios microorganismos tienden a tener un rango intrínseco de pH dentro del cual llevan a cabo sus funciones óptimamente, aunque la mayoría de ellos crecen mejor en un rango cercano al neutro (pH 6.5 – 7.5). Los microorganismos se clasifican en acidófilos, neutrófilos o alcalófilos, según su tolerancia al pH. Bajo condiciones altamente ácidas o alcalinas, los componentes celulares de la mayoría de los microorganismos son hidrolizados y las enzimas desnaturalizadas. Para sobrevivir en condiciones ácidas, los microorganismos deben mantener un pH cercano al neutral bombeando protones hacia afuera de la célula, por lo que la membrana de los procariontes es muy impermeable a los protones (Jjemba, 2004). Diferencias entre el pH interno y el pH ambiental afecta el transporte de iones y sustancias a través de la membrana celular (Horikoshi & Grant, 1998).

Adaptación a la salinidad

La salinidad es otro factor que afecta a los organismos, aunque hay organismos que están adaptados para resistir las altas concentraciones presentes en algunos ambientes. La salinidad, además de afectar la presión osmótica, en una concentración elevada puede desnaturalizar las proteínas, afectando la estructura terciaria (Atlas & Bartha, 2002).

Los organismos adaptados para soportar altas concentraciones de sal se denominan *halotolerantes*, asimismo hay organismos que requieren de una alta salinidad para llevar a cabo sus funciones, a los cuales se les denomina *halófilos* (Gilmour, 1990, citado por Atlas & Bartha, 2002).

La salinidad puede modificarse a lo largo del tiempo, durante el periodo de un año la salinidad puede cambiar. Durante la temporada de lluvia, la concentración de sal se diluye, mientras que durante la temporada de seca la salinidad aumenta, modificando así el ambiente (Dodds, 2002).

Cuando se asocian una alta temperatura con una alta salinidad, la presencia de organismos se reduce más, y si con estos dos se encuentra un alto o bajo pH, se restringe mucho más la biota.

Productores primarios de los manantiales termales

Dentro del grupo de microorganismos termófilos podemos encontrar diferentes grupos, tanto eucariontes como procariontes, como son bacterias, arqueobacterias, protozoarios, algas y hongos, los cuales son en su mayoría mesófilos (Horikoshi & Grant, 1998).

En la mayoría de los ambientes termales está presente una gran variedad de formas de vida termófila e hipertermófila (extremófila), principalmente procariontes. En la tabla 1, tomada de Madigan *et al.*, (2001), se muestran los principales grupos de procariontes de ambientes termales.

Los principales productores primarios de estos ambientes son los organismos procariontes, ya que son los que pueden soportar altas temperaturas (Madigan *et al.*, 2001).

Tabla 1. Grupos más importantes de procariontes termófilos e hipertermófilos.

Género	Temperatura (° C)
Eubacteria	
Fototróficas	
Cianofitas	55-70
Bacterias púrpuras	45-60
Bacterias verdes	40-73
Bacterias Gram positivas	
<i>Bacillus</i>	50-70
<i>Clostridium</i>	50-75
Bacterias lácticas	50-65
Actinomicetos	55-75
Otras bacterias	
<i>Thiobacillus</i>	50-60
Espiroquetas	54
<i>Desulfotomaculum</i>	37-55
Aerobios Gram negativos	50-75
Anaerobios Gram negativos	50-75
<i>Thermotoga/Aquifex</i>	55-95
<i>Thermus</i>	60-80
Archaea	
Metanógenos	45-110
Termófilos dependientes de a	60-113
<i>Thermoplasma</i>	37-60

Plantas y animales multicelulares no pueden resistir temperaturas superiores a los 50° C, pero algunos eucariontes unicelulares y hongos filamentosos pueden resistir temperaturas por arriba de los 62° C. Productores primarios como las bacterias fotosintéticas se pueden encontrar por arriba de los 73° C (Dodds, 2002).

En las más altas temperaturas, las bacterias que oxidan el sulfuro son los productores primarios dominantes (Dodds, 2002).

Algas

Las cianofitas (Cyanophyceae) son de gran importancia en la colonización de manantiales termales no-ácidos en el mundo. Mientras que, de acuerdo con Lee (1999), no existe presencia de eucariontes (fotosintéticos y no fotosintéticos) en ambientes termales por encima de los 56 a 60° C. En manantiales ácidos (pH < 4) y temperaturas mayores a 56° C no hay organismos fotosintéticos (Brock, 1973, citado por Lee, 1999).

Las cianofitas termófilas están especialmente adaptadas para crecer en temperaturas relativamente altas. *Synechococcus lividus* Copeland puede crecer a temperaturas por arriba de los 73° C pero deja de crecer cuando en cultivo se baja a 54° C, presenta un crecimiento óptimo de 60 a 63° C (Meeks y Castenholz, 1971). Enzimas aisladas de algas termófilas son más estables a altas temperaturas que las aisladas de otros organismos (Lee, 1999).

La estructura de la pared celular de las cianofitas es básicamente la misma que la de las bacterias Gram-negativas, lo que indica una posible relación entre estos dos grupos (Lee, 1999).

En ambientes de agua dulce, las diatomeas (Bacillariophyceae) a veces comprenden la flora algal dominante en aguas termales de entre 30 y 40° C (Lee, 1999). Se ha observado que, *Achnanthes exigua* Grunow aislada de ambientes termales, presenta un óptimo fotosintético de 42° C, con una temperatura máxima y mínima de 44 y 10° C, respectivamente, características de un organismo termófilo (Fairchild y Sheriden, 1974, citado por Lee, 1999).

Existen también algas clorofilas (Chlorophyceae), una de las cuales es *Zigogonium* sp. que vive junto a manantiales termales en Yellowstone, la cual se presenta en temperaturas de 21 a 30° C y un pH de 2.4 a 3.1; presenta actividad fotosintética óptima a los 25° C, y pH óptimo de 1 a 5 (Lee, 1999). *Cyanidium caldarium* (Tilden) Geitler, del grupo de las rodofitas, es un organismo fotosintético encontrado en los ambientes termales volcánicos y suelos calientes con pH menor que 5 y temperaturas promedio que exceden los 40° C (Doemel & Brock, 1971, citado por Lee, 1999).

En la tabla 2, tomada de Madigan *et al.*, (2001), se muestran diferentes grupos de organismos y sus límites de temperatura.

Tabla 2. Límites de temperatura conocidos en la actualidad para el crecimiento de seres vivos.

Grupo	Límites térmicos superiores (° C)
Animales	
Peces y otros vertebrados acuáticos	38
Insectos	45-50
Ostrácodos (crustáceos)	49-50
Plantas	
Plantas vasculares	45
Musgos	50
Organismos eucariontes	
Protozoarios	56
Algas	55-60
Hongos	60-62
Procariontes	
<i>Eubacteria</i>	
Cianofitas	70-74
Fotótrofos anoxigénicos	70-73
Quimiorganótrofos/quimiolitótrofos	95
<i>Archaea</i>	
Quimiorganótrofos/quimiolitótrofos	113

Generalmente, la biota de los manantiales termales es menos diversa al aumentar la temperatura, aunque hay organismos como las cianofitas que aparentemente prefieren temperaturas relativamente altas (30 - 40° C) (Dodds, 2002).

Similar a lo que sucede con la temperatura, al aumentar o disminuir la salinidad y/o el pH, la presencia de organismos se ve afectada, la gran mayoría de los organismos llevan a cabo sus funciones en salinidades moderadas y alrededor de un pH neutro (Dodds, 2002).

En general estos ambientes suelen presentar una diversidad menor a los ambientes templados, ya que la mayoría de los organismos se establecen en las temperaturas intermedias, es decir, son mesófilos. Aunque esto no quiere decir que no existan ambientes con alta diversidad biológica, como es el caso de Yellowstone, donde se tienen registradas más de 300 especies de cianofitas (Copeland, 1936).

De lo anterior se desprende que la coincidencia de factores limitantes extremos (temperatura, pH, salinidad) en los manantiales termales, reduce drásticamente la diversidad biológica.

El estudio de la biota que se desarrolla en estos ambientes, así como las adaptaciones que presentan, han cobrado relevancia, en gran parte porque estos ambientes extremos presentan condiciones muy similares a las que tenía la Tierra en sus primeras etapas de formación.

OBJETIVO

Caracterizar la diversidad algal del manantial termal Los Hervideros, Michoacán, y establecer la relación entre la distribución de las especies y la temperatura.

ÁREA DE ESTUDIO

El presente trabajo fue llevado a cabo en la localidad de Los Hervideros en el municipio de Araró, el cual se encuentra ubicado en una zona geotérmica situada en la ribera sureste del lago de Cuitzeo, a 5 Km al norte del poblado de Zinapécuaro, Michoacán (Fig. 2). Presenta un área de hidrotermalismo superficial que se ubica en las inmediaciones del poblado de Zimirao (Tovar Aguado, 1991).

La localidad se encuentra en $19^{\circ} 53' \text{ LN}$ y $100^{\circ} 48' \text{ LO}$. El tipo de vegetación presente es Bosque espinoso y clima seco o estepario con régimen de lluvias en verano (BSw), cuenta con una precipitación promedio anual de 780.2 mm y una temperatura promedio anual de 18.6° C (INEGI, 2005) (Fig. 2).

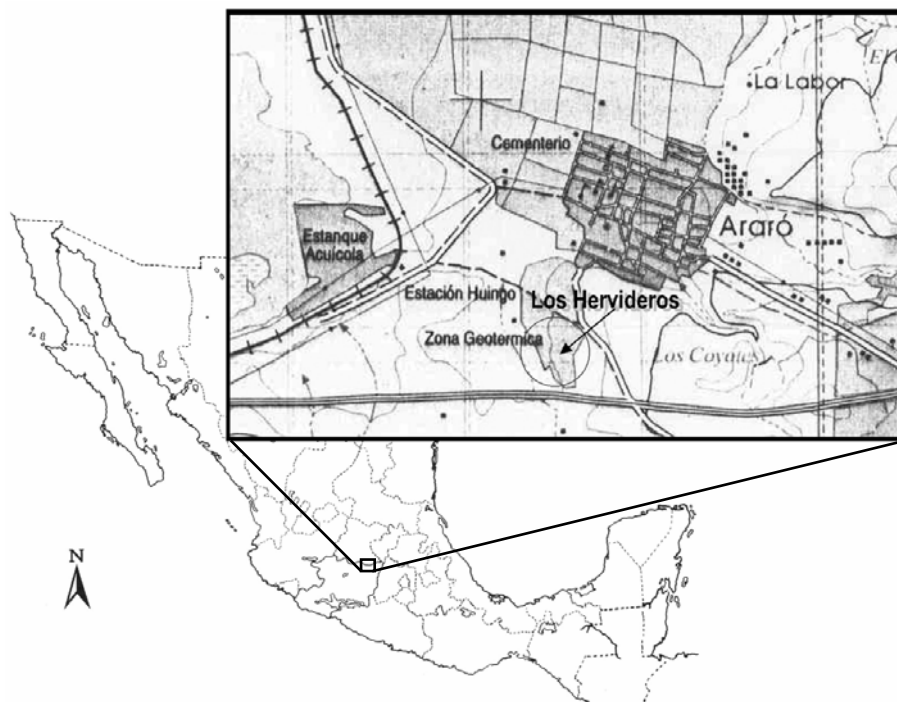


Fig. 2. Ubicación geográfica de Los Hervideros, en el estado de Michoacán.

Araró pertenece a la cuenca del lago de Cuitzeo, el cual es una zona de importancia económica y turística.

Se trata de una descarga lateral de la fuente que alimenta la zona geotérmica de Los Azufres, en el mismo estado (Alonso-Reyes, 1997).

El área de manifestaciones termales se ubica al suroeste del poblado de Araró. Está constituida por un nivel freático somero (1 m) que se mezcla con agua termal, que brota en la superficie en forma de pozos calientes con poco gasto (en promedio 10 a 20 L min⁻¹) y temperatura altamente variable (40 a 92 °C). Esta zona está constituida por un nivel freático por encima del cual existe una capa arcillosa formada por depósitos lacustres que actúan como capa sello, lo que hace que el termalismo se manifieste sólo en donde existe la ruptura de la capa (Tovar-Aguado, 1991).

En estos sitios se producen depósitos superficiales de roca caliza, en donde el hidrotermalismo se ha prolongado durante mucho tiempo, que subsisten incluso como evidencia de actividad volcánica antigua (Tovar-Aguado, 1991).

Las aguas de los manantiales de la zona de Araró muestran un alto contenido de cloruros, lo que da paso a la suposición de una mezcla entre aguas del yacimiento ligeramente diluidas por aguas meteóricas y de la cercana laguna de Cuitzeo (Ramírez-Domínguez *et al.*, 1988).

Estudios previos han mostrado que el agua de Los Hervideros es ligeramente básica (pH = 7.7), además de que presenta altas concentraciones de cloruros (Tabla 3), con la siguiente dominancia iónica (Ramírez-Domínguez *et al.*, 1988):

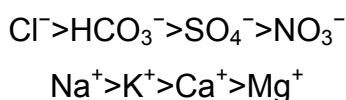


Tabla 3. Composición química del agua de Los Hervideros (Ramírez-Domínguez, *et al.*, 1988).

Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺
1290.2	158.5	153.6	0.2	756.5	60.6	32.6	0.5

Concentración de iones = ppm

Esta área de manantiales termales representa una importante actividad económica para los pobladores de las zonas aledañas, ya que el agua se utiliza

con fines recreativos y terapéuticos en los balnearios, además de que se extrae sal del suelo (Figs 3 y 4).



Fig. 3. Salinas en Los Hervideros, Michoacán.



Fig. 4. Balneario Los Hervideros, Michoacán.

El área de colecta consta de una corriente principal de agua superficial, que es constante todo el año, ya que recibe aportes de agua de pequeños manantiales de agua caliente. La parte colectada es una sección de esta corriente que fue dividida en 6 puntos de colecta, donde se tomaron 13 muestras, tomando en cuenta los distintos aportes de agua y crecimientos algales (Figs 5-9).

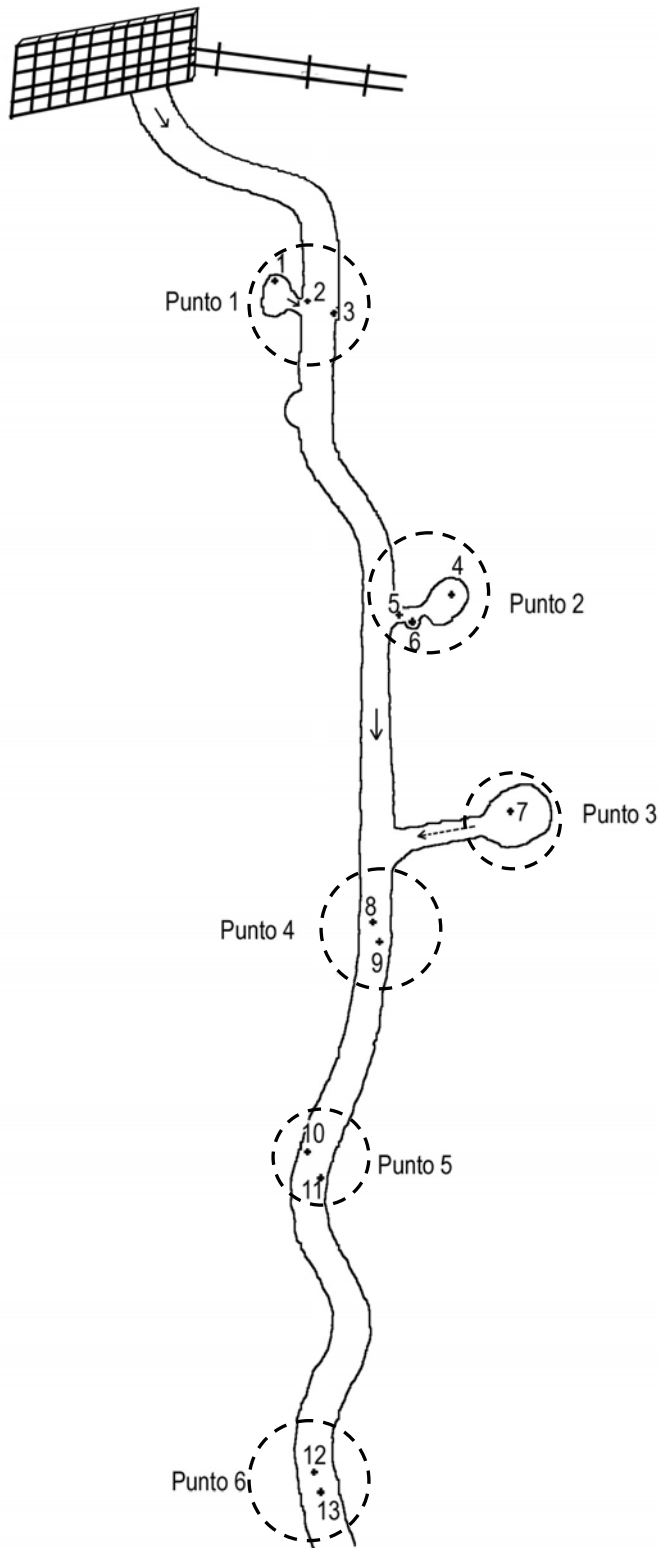


Fig. 5. Esquema detallado de los puntos de colecta (---) y las muestras recolectadas (•) en la localidad de Los Hervideros, donde se pueden observar los puntos que vierten el agua caliente (1, 2 y 5). El punto 3 es intermitente, es decir, que no todo el año vierte agua al arroyo, además de que su temperatura no es muy alta.

(→) dirección del flujo de agua.



Fig. 6. Punto de colecta 1.

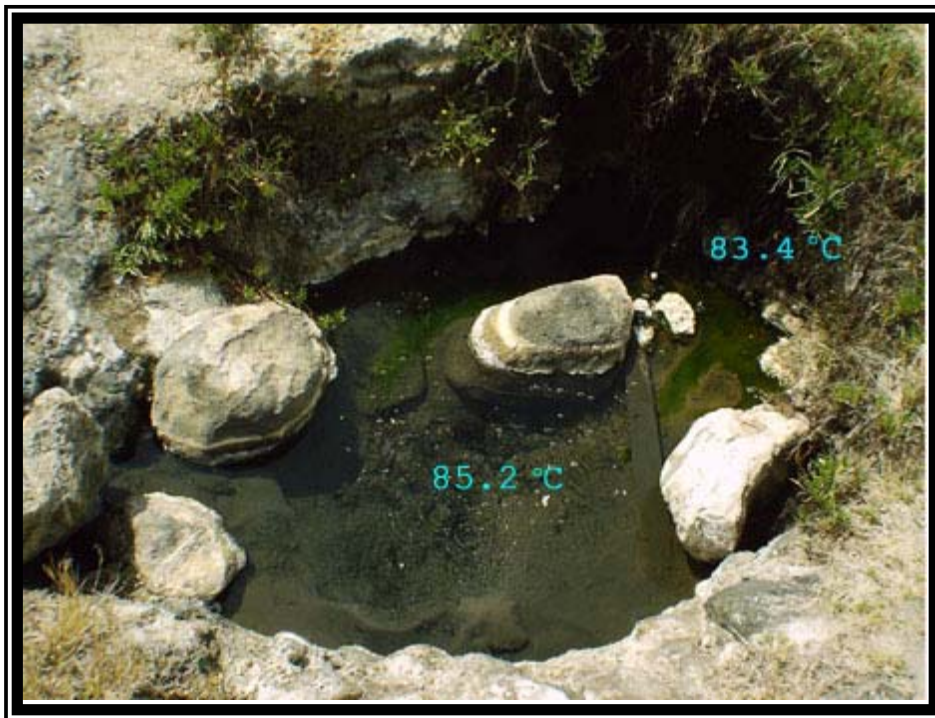


Fig. 7. Punto de colecta 2.



Fig. 8. Punto de colecta 3.



Fig. 9. Punto de colecta 4.

ANTECEDENTES

En la antigüedad los manantiales termales se utilizaban como baños, durante la expansión del imperio Romano (Castenholz & Wickstrom, 1975).

Los sistemas hidrotermales han jugado un papel fundamental en la evolución temprana de nuestro planeta y en los procesos endógenos para la síntesis de los compuestos orgánicos esenciales para la vida (Pantoja-Alor & Gómez-Caballero, 2004).

En México, por el alto número de zonas geotérmicas que presenta, existen estudios de manantiales orientados principalmente a la generación de electricidad y al estudio de los procesos geotérmicos relacionados. Sin embargo, a pesar del creciente interés de la biota de estos ecosistemas, por presentar condiciones similares a las encontradas en la Tierra en las primeras fases de la evolución biológica, sólo se ha registrado el trabajo de Zaragoza & Mora-Navarro (2000), donde se elaboró un listado ficoflorístico.

Para México, el número registrado de zonas geotérmicas o focos termales, hasta ahora, alcanzan más de 545 (Pantoja-Alor & Gómez-Caballero, 2000).

En el caso específico de Michoacán, se han hecho estudios geotérmicos y geoquímicos en varias regiones dentro de las cuales se incluye a Los Hervideros, donde se estudió la química del agua, destacando en su composición el cloruro ($\text{Cl}^- = 1290.2 \text{ mg l}^{-1}$) y el sodio ($\text{Na}^+ = 756.5 \text{ mg l}^{-1}$) que podemos considerar como altos, siendo éste un ambiente epicontinental. También los silicatos ($\text{SiO}_2 = 257.5 \text{ mg l}^{-1}$) y sulfatos ($\text{SO}_4^{=4} = 153.6 \text{ mg l}^{-1}$) son relativamente altos con respecto a otros iones encontrados aquí. Por estas razones Los Hervideros recibe la denominación de manantial clorurado (Ramírez-Domínguez, *et al.*, 1988).

A nivel mundial podemos hacer referencia a trabajos realizados en Yellowstone, E.U., por Copeland (1936) y Brock (1978) y el de Anagnostidis *et al.* (1988), sobre cianofitas de manantiales termales de Grecia.

MATERIAL Y MÉTODO

Se llevaron a cabo dos colectas de material ficológico en la zona de Los Hervideros entre los meses de Abril de 2004 y Enero de 2005. La primera fue prospectiva para realizar una revisión general y toma de datos para la planeación del proyecto. La localidad fue georeferenciada con un GPS Garmin modelo GPS 45, obteniéndose las coordenadas 19° 53' LN y 100° 48' LO y encontrándose a una altura de 1879 m.s.n.m. La temperatura, conductividad y pH se midieron con un conductímetro-potenciómetro marca Conductronic PC-18($\pm 1\%$) en cada uno de los puntos de colecta. Un total de 13 muestras fueron recolectadas en cada colecta, de forma directa o con ayuda de un cucharón (en las partes en las que la temperatura superaba los 50 °C). En el campo fueron realizadas observaciones del material vivo, para denotar coloración, movimiento y otros caracteres morfológicos. Las muestras se transportaron en frío, para evitar la descomposición del material biológico. En el laboratorio las muestras fueron fijadas con formol al 4% y se elaboraron preparaciones semipermanentes con gelatina glicerinada a partir de éstas (ver Anexo I). La limpieza de las muestras que presentaban diatomeas se hizo utilizando la técnica de oxidación ácida y montaje en Naphrax[®] (St. Clair & Rushforth, 1976) (ver Anexo II). Para la observación de las muestras se utilizó un microscopio óptico Olympus BX51 con una cámara digital Olympus DP12. Las diatomeas fueron medidas (de 2 a 25 frústulos) directamente en el microscopio, utilizando una reglilla, mientras que la medición de las cianofitas (de 5 a 40 células) y clorofilas (35 células) se llevó a cabo con ayuda del programa de análisis de imagen SigmaScan Pro 5.

Las muestras colectadas en esta localidad se incorporaron a la colección, de Manantiales Termales con la clave MT, de la sección de algas de agua dulce del Herbario de la Facultad de Ciencias, UNAM (FCME).

La identificación de las especies se llevó a cabo siguiendo los siguientes esquemas taxonómicos, para Bacillariophyceae: Kramer & Lange-Bertalot, (1986, 1988, 1991b) y Germain, (1981); Cyanophyceae: Komárek & Anagnostidis, (1998, 2005); y Chlorophyceae: Mrozinska, (1985).

RESULTADOS

Ecología y distribución

De los parámetros registrados sólo la temperatura mostró variación importante y osciló de 22 a 83 °C, con un promedio de 55.6 °C, la conductividad registrada fue de 3400 a 4430 $\mu\text{S cm}^{-1}$, lo que refleja una alta concentración de iones disueltos, principalmente Cl^- y Na^+ , y un pH que vario de 7.5 a 8. Estos resultados indican que éste es un manantial neutro a ligeramente básico, de acuerdo al esquema de Brock (1974). En la tabla 4 se muestra la variación de la temperatura a lo largo del canal principal, así como los tipos de crecimiento presentes.

Tabla 4. Distribución de temperaturas y tipos de crecimiento en la localidad.

Punto	Muestra	Temperatura (° C)	Tipo de crecimiento
1	1	47	Bentónico terrestre
	2	47	Bentónico interfase
	3	58	Bentónico sumergido
2	4	83.4	Bentónico sumergido
	5	76	Bentónico sumergido
	6	35.5	Masa flotante
3	7	30.4	Bentónico sumergido
4	8	22.2	Bentónico sumergido
	9	22.2	Bentónico sumergido
5	10	73	Bentónico sumergido
	11	61	Bentónico sumergido
6	12	54.7	Bentónico sumergido
	13	54.7	Bentónico sumergido

Análisis de diversidad

Se registraron un total de 34 especies, de las cuales 21 (63%) son diatomeas, 12 (34%) cianofitas y 1 (3%) clorofitas (Tabla 5) (ver Anexo III). La presencia de las especies varió considerablemente con respecto a la temperatura. El mayor número de especies se presentó a los 47 °C. Las especies presentes a mayor

temperatura (73 - 83.4 °C) fueron: *Leptolyngbya* sp., *Synechococcus bigranulatus*, *Phormidium boryanum*, *Pseudoanabaena thermalis*, *Synechocystis* sp., *Pseudoanabaena* sp. También se encontraron frústulos de: *Denticula thermalis*, *Nitzschia granulata*, *Pinnularia termitina* y *Rhopalodia gibberula*.

Los crecimientos algales visibles estuvieron principalmente formados por cianofitas, entremezcladas en tapetes mucilaginosos. Las principales especies relacionadas con estos tapetes fueron: *Phormidium boryanum*, *Leptolyngbya* sp., *Synechococcus bigranulatus* y *Synechocystis* sp., variando la proporción de especies en los diferentes puntos colectados.

Tabla 5. Listado florístico y presencia de acuerdo a la temperatura.

Clase/Especie	Temperatura (° C)											
	22.2	30.4	35.5	47	54.7	58	61	70.8	73	76	83.4	85.2
Bacillariophyceae												
<i>Achnanthes exigua</i> Grunow	X	X		X	X							
<i>Amphora veneta</i> Kützing				X	X							
<i>Anomoeoneis costata</i> (Kützing) Schmid		X		X								
<i>Caloneis silicula</i> (Ehrenberg) Cleve				X								
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg		X		X	X							
<i>Denticula thermalis</i> Kützing				X	X						X	
<i>Diploneis elliptica</i> Kützing		X		X	X							
<i>Epithemia turgida</i> (Ehrenberg) Kützing				X								
<i>Gomphonema gracile</i> Ehrenberg				X	X							
<i>Luticola mutica</i> (Kützing) D. G. Mann				X								
<i>Navicula radiosa</i> var. <i>tenella</i> (de Brebisson) Grunow	X	X		X								
<i>Nitzschia</i> aff. <i>calida</i> Grunow				X								
<i>Nitzschia</i> aff. <i>clausii</i> Hantzsch				X								
<i>Nitzschia granulata</i> Grunow				X	X						X	
<i>Nitzschia hantzschiana</i> Rabh.	X			X								
<i>Nitzschia inconspicua</i> Grunow				X								
<i>Nitzschia</i> sp.				X								
<i>Pinnularia</i> sp.				X								
<i>Pinnularia termitina</i> (Ehrenberg) Patrick.				X							X	
<i>Pinnularia viridis</i> (Nitzsch) Ehrenberg		X		X								
<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehrenberg) O. Mull.	X	X		X							X	
Cyanophyceae												
<i>Chroococcus</i> cf. <i>thermalis</i> (Meneghini) Nägeli	X											
<i>Chroococcus</i> sp.	X											
<i>Leptolyngbya</i> sp.	X				X	X	X	X	X	X	X	
<i>Mastigocladus</i> cf. <i>laminosus</i> Frémy					X							
<i>Nostoc</i> sp.	X		X									
<i>Phormidium boryanum</i> Anagnostidis & Komárek	X				X	X	X			X		
<i>Phormidium</i> sp.	X											
<i>Pseudoanabaena</i> sp.					X				X			
<i>Pseudoanabaena thermalis</i> Anagnostidis	X			X	X		X	X	X	X		
<i>Synechococcus bigranulatus</i> Skuja				X	X					X	X	
<i>Synechococcus</i> sp.				X	X							
<i>Synechocystis</i> sp.	X			X	X	X	X	X	X	X		
Chlorophyceae												
<i>Oedogonium</i> sp.		X	X									
Total 34	12	8	2	24	15	3	4	3	4	5	6	0

El grupo que tuvo el mayor número de especies fue el de las diatomeas, aunque sus crecimientos fueron notablemente menores que los de los otros dos grupos; las cianofitas presentaron un número de especies menor que las anteriores, pero presentaron los crecimientos evidentemente más grandes de todos; y por último, el grupo de las clorofitas, que en éstos manantiales cuenta sólo con una especie representante, presentó crecimientos considerablemente grandes (Fig. 10).

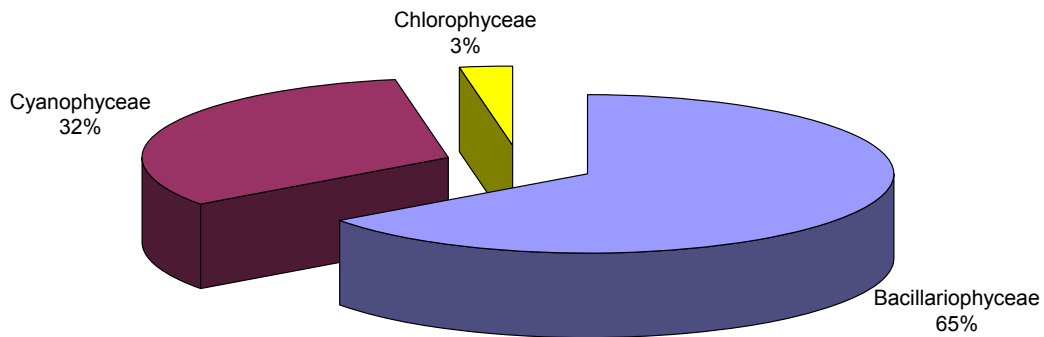


Fig. 10. Proporción de grupos algales.

En la siguiente gráfica (Fig. 11) podemos observar que la mayor proporción de las especies de diatomeas quedaron dentro del grupo de los organismos mesófilos y termófilos y sólo una pequeña proporción quedó dentro de los extremófilos, encontrándose sólo los frústulos vacíos en temperaturas de hasta 83.4° C.

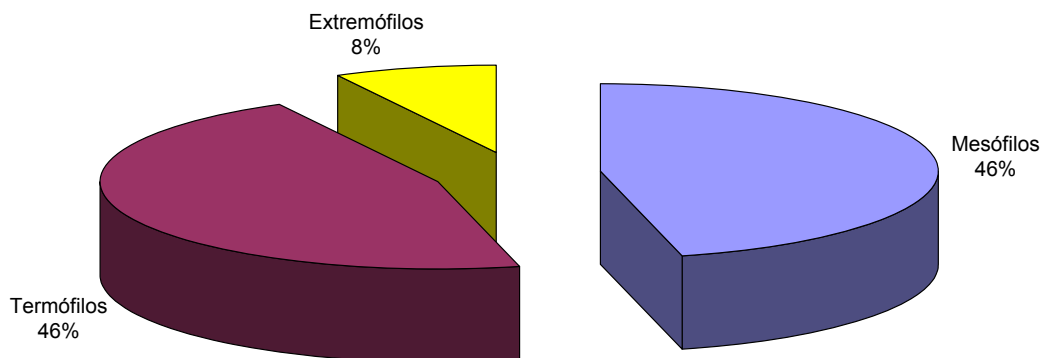


Fig. 11. Agrupación de Bacillariophyceae con respecto a su tolerancia a la temperatura.

Por último, la siguiente gráfica (Fig. 12) nos muestra las proporciones de las especies de cianofitas donde la mayor parte fueron mesófilos, en menor proporción termófilos y por último extremófilos, siendo mayor el porcentaje de éstos últimos que en las diatomeas.

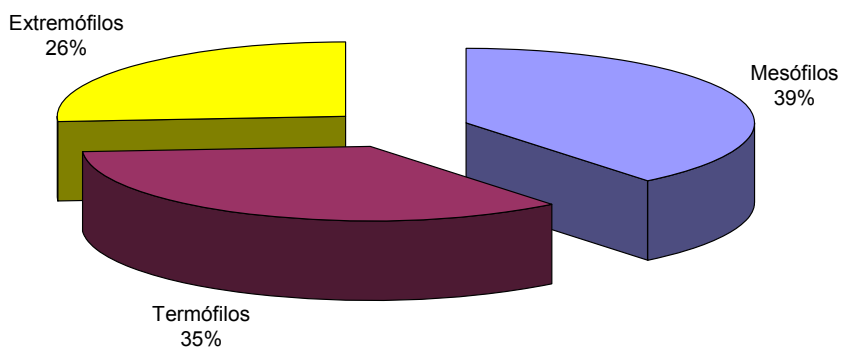
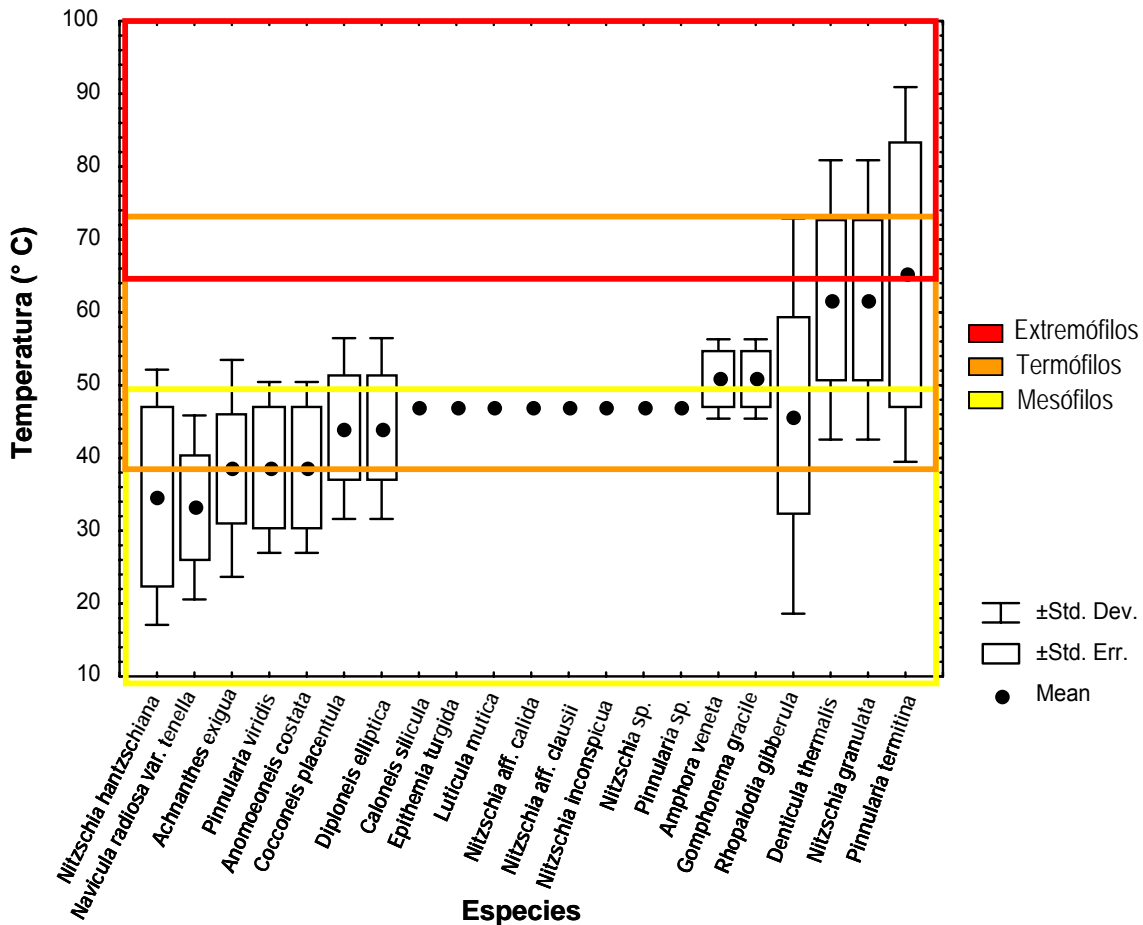


Fig. 12. Agrupación de Cyanophyceae con respecto a su tolerancia a la temperatura.

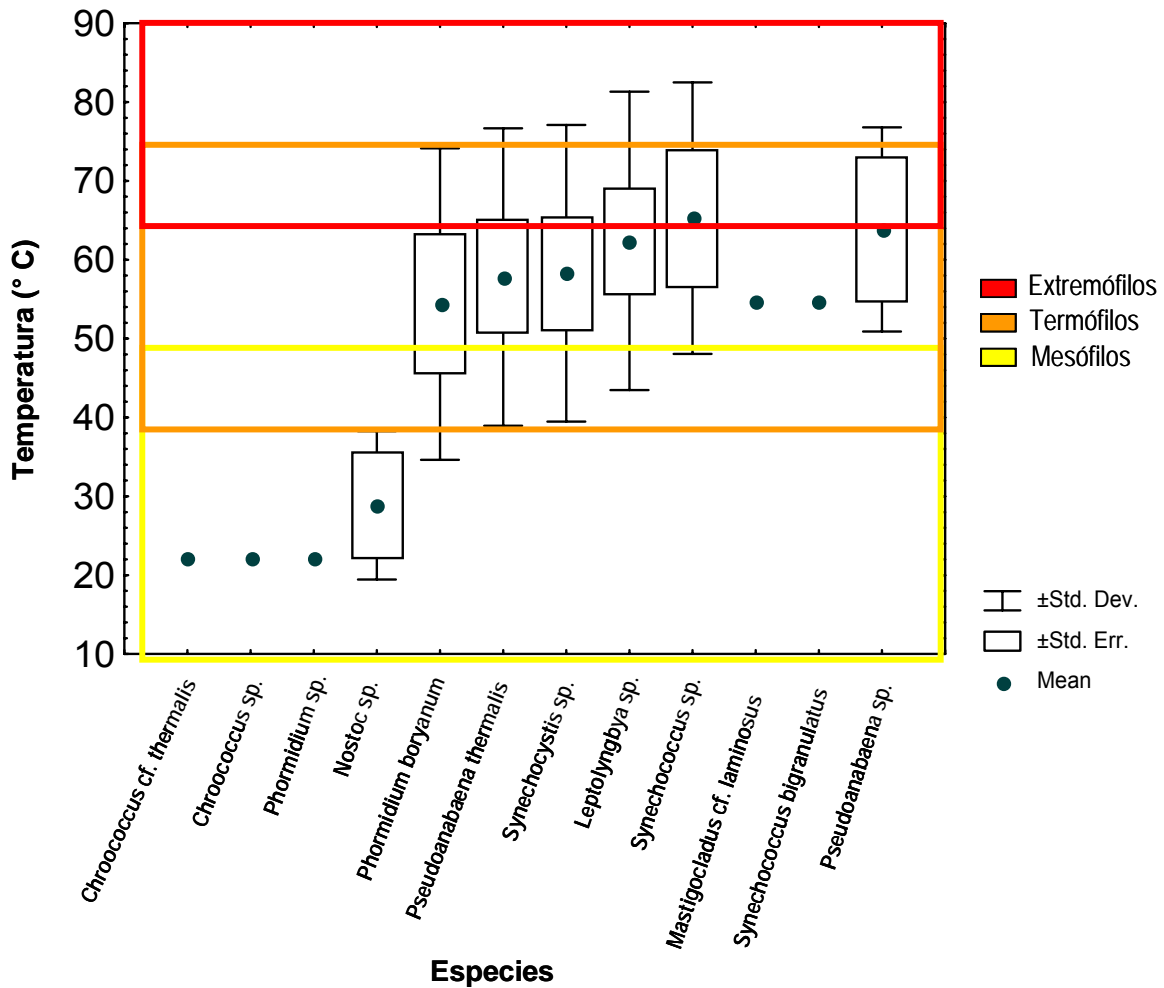
En las siguientes gráficas podemos observar como se agrupan las diferentes especies de algas de acuerdo a la agrupación hecha por Jjemba (2004) y también se puede observar su distribución de acuerdo al gradiente de temperatura. Las diatomeas fueron en su mayoría mesófilos-termófilos y algunos termófilos. Sólo *Pinnularia termitina* entraría dentro del grupo de organismos extremófilos, que más adelante será discutido (Fig. 13). En las cianofitas podemos notar que la mayoría fueron termófilos, algunos mesófilos y pocos quedaron dentro del grupo extremófilos. Y en el caso de la especie única de clorofila, quedó agrupada dentro de los organismos mesófilos, ya que solo se encontró en el intervalo de los 30° a los 35° C.

Fig. 13. Distribución y agrupación de Bacillariophyceae con respecto a la temperatura.



Se puede observar que las cianofitas tuvieron un rango más amplio de tolerancia a la temperatura (Fig. 14), al contrario que las diatomeas y la especie de clorofita que se distribuyeron más puntualmente en el gradiente de temperatura.

Fig. 14. Distribución y agrupación de Cyanophyceae con respecto a la temperatura.



Descripción de especies

Para las especies que no pudieron ser identificadas con las claves de empleadas, se empleó el epíteto "sp", y se incluyó la descripción; para las especies similares a alguna especie previamente descrita, pero con alguna diferencia importante (v.gr. dimensiones, ecología etc), se emplearon los términos cf. (confertim= cercano) o aff. (affinis = vecino, similar a).

Clase Bacillariophyceae

Achnanthes exigua. Fig. 15. Muestras MT1, MT4, MT7 y MT8.

Frústulos con formas ligeramente capitadas en los más grandes y formas romboidales en los frústulos más pequeños. El largo de los frústulos va de 8 a 15 μm y de ancho de 4 a 5 μm , con un número de estrías en 10 μm que va de 22 a 30, ligeramente radiadas e interrumpidas en el centro.

Amphora veneta. Fig. 16. Muestra MT1.

Frústulos elípticos, rostrados en los extremos, de 13 a 26 μm de largo y de 6 a 10 μm de ancho y un número de estrías de 17 a 22 en 10 μm ligeramente radiadas siendo más marcadas y más separadas hacia el centro.

Anomoeoneis costata. Fig. 17. Muestra MT1.

Frústulos de forma romboidal redondeados en los extremos, de 70 a 72 μm de largo y de 19 a 20 μm de ancho y con número de estrías de 14 en 10 μm , la rafe definido, con dos hileras de areolas que van de un extremo al otro entre la rafe y las estrías, sin llegar a unirse sino hasta los extremos.

Caloneis silicula. Fig. 18. Muestra MT1.

Diatomeas con Frústulos capitados y ensanchados en la parte central, de tamaño relativamente pequeño, de 38 μm de largo y de 12 μm de ancho, con 25 estrías en 10 μm , con una interrupción de estas en el centro, con la rafe definido.

Cocconeis placentula. Fig. 19. Muestra MT1.

Frústulos elípticos de 21 a 33 μm de largo y de 12 a 17 μm de ancho. La rafe se encuentra en la parte marginal de la valva. El número de estrías en 10 μm es de 18 a 22, punteadas.

Denticula thermalis. Fig. 20. Muestras MT1, MT4, MT8 y MT13.

Frústulos en vista valvar de forma alargada con terminaciones en puntas redondeadas de 22 a 55 μm de largo y ancho de 6 a 8 μm , en vista conectiva son de forma rectangular con las puntas redondeadas de 10 a 17 μm de ancho y un número de estrías de forma recta en 10 μm de 17 a 21 y de 3 a 4 lanceolas en 10 μm , y la rafe no es visible.

Diploneis elliptica. Fig. 21. Muestras MT1 y MT8.

Frústulos elípticos de 21 a 34 μm de largo y de 12 a 16 μm de ancho. Las estrías son ligeramente radiadas en el centro y es más marcado en los extremos, de 11 a 12 en 10 μm . El área central conserva una forma elíptica.

Epithemia turgida. Fig. 22. Muestras MT1 y MT4.

Diatomea de tamaño considerablemente grande con frústulos que van de 64 a 102 μm de largo y de 13 a 16 μm , de forma curvada, con un número de estrías de 2 a

3 en 10 μm y de 9 a 10 areolas en 10 μm . La rafe se extiende desde un lado del centro hacia los extremos al lado contrario.

Gomphonema gracile. Fig. 23. Muestras MT1 y MT4.

Diatomea con frústulos de forma heteropolar con una longitud de 23 a 38 μm y de 6 a 9 μm de ancho en la parte media. El número de estrías en 10 μm es de 10 a 13, también en la parte media. Las estrías de lado más angosto suelen estar más juntas y ser más tenues.

Luticula mutica. Fig. 24. Muestra MT1.

Los ejemplares pequeños de esta especie presentan frústulos de forma romboidal, los miembros más grandes presentan formas capitadas y los de tamaño intermedio se encuentran entre éstas formas de frústulos. Presentan frústulos lanceolados, que tienen una longitud de 11 a 20 μm y 5 a 7 de ancho, el número de estrías en 10 μm va de 16 a 25 y son un poco radiadas. Las estrías se interrumpen en la parte central, donde queda un rectángulo vacío y sólo se puede apreciar un estigma ubicado en una posición centro-lateral.

Navicula radiosa var. *tenella*. Fig. 25. Muestras MT1, MT4 y MT7.

Esta variedad se diferencia de la especie por ser de dimensiones menores, la longitud de los frústulos es de 17 a 30 μm , de 5 a 8 μm de ancho y presenta un número de estrías que va 13 a 17 en 10 μm . Presentan una forma ovalada con los extremos más acentuados. La disposición de las estrías es radial y en los extremos van en la dirección opuesta.

Nitzschia aff. calida. Fig. 26. Muestras MT1, MT7, MT8 y MT13.

Frústulos muy sencillos, alargados y terminados en punta, con una ligera constricción en la parte central, que miden de 56 a 77 μm de largo y de 10 a 15 μm de ancho. De 9 a 12 estrías en 10 μm , que son rectas y atraviesan de un lado a otro y presentan de 8 a 10 fíbulas en 10 μm . Presencia de la rafe axial.

Nitzschia aff. clausii. Fig. 27. Muestras MT1, MT8 y MT13.

Los frústulos presentan una forma de S, limitada a los extremos, los cuales son ligeramente capitados. Esta especie presenta dimensiones que van de 40 a 48 μm de longitud, de 4 a 5 μm de ancho, presenta de 9 a 11 fíbulas en 10 μm y tiene de 9 a 10 estrías en 10 μm , las cuales son muy finas.

Nitzschia granulata. Fig. 28. Muestras MT1, MT8 y MT13.

Frústulos de forma ovalada que terminan en una ligera punta, de 24 a 38 μm de largo y de 14 a 21 μm de ancho, con 3 a 7 areolas grandes en 10 μm que forman líneas y de 3 a 6 fíbulas en 10 μm .

Nitzschia hantzschiana. Fig. 29. Muestras MT1 y MT8.

La forma de los frústulos, en general, es alargada y angosta con los extremos ligeramente capitados. Es una especie de tamaño muy variable que va de 18 a 64 μm de largo, de 2 a 6 μm , con un número de fíbulas en 10 μm de 6 a 14 y de 16 a 30 estrías, también en 10 μm .

Nitzschia inconspicua. Fig. 30. Muestra MT1.

Especie pequeña, con frústulos que van de 7 a 13 μm de largo, 3 a 4 μm de ancho y con un número de fíbulas en 10 μm de 6 a 12. Las estrías no son visibles al microscopio óptico y los extremos son ligeramente capitados.

Nitzschia sp. Fig. 31. Muestra MT1.

Esta especie presenta frústulos relativamente pequeños, alargados y ligeramente capitados, con una forma ovalada en la parte media. Su tamaño va de 9 a 25 μm de largo y de 3 a 4 μm de ancho. Estrías no visibles al microscopio óptico. Llega a presentar un número de fíbulas en 10 μm de 9 a 18.

Pinnularia sp. Fig. 32. Muestras MT1 y MT4.

Especie muy rara, en estas muestras presenta frústulos de forma oval relativamente grandes y en algunos casos son muy ligeramente capitados, su tamaño va de 99 a 136 μm de largo y de 27 a 33 μm de ancho, con número de estrías que va de 11 a 13 en 10 μm , estas se presentan a lo largo de toda el frústulo, son rectas y ligeramente radiadas en la parte central, nunca llegan a tocar la rafe.

Pinnularia termitina. Figs. 33 y 34. Muestras MT1 y MT4.

Esta especie es muy similar a *P. subcapitata*, llega a tener las mismas dimensiones, pero se diferencia por la parte central que es más abierta. El largo de los frústulos va de 13 a 21 μm , 4 a 5 μm de ancho y presenta de 15 a 20 estrías en 10 μm . Las estrías se ven interrumpidas en la parte central, son ligeramente radiadas en la parte central, cambiando de dirección hacia los extremos que son capitados.

Pinnularia viridis. Figs. 35 y 36. Muestras MT1 y MT8.

Es una especie de tamaño considerablemente grande, con frústulos que van de 85 a 117 μm de largo, de 16 a 26 μm de ancho, con un número de costillas en 10 μm de 8 a 10, sin interrupción en el centro y se encuentran ligeramente separadas de la rafe. En los extremos no se presentan costillas.

Rhopalodia gibberula. Figs. 37 y 38. Muestras MT1 y MT4.

Esta es una especie con frústulos de tamaño muy variable que va de 18 a 85 μm de largo, 10 a 32 μm de ancho, con un número de costillas en 10 μm de 3 a 5 y de 15 a 20 estrías en 10 μm . Ligeramente constreñida en la parte central. No se logran distinguir claramente las areolas.

Clase Cyanophyceae

Chroococcus sp. Fig. 39. Muestra MT8

Colonias con pocas células (2 a 4 células), envueltas por un mucílago transparente que puede ser o no visible, de 0.8 a 1.5 μm de espesor y ocasionalmente se puede observar lamelado. Las colonias forman agregados que van de 2 a 10 y muy pocas veces se les encuentra solitarias. Generalmente se encuentran junto con otras especies. Las células son de color verde-azul a verde grisáceo. El contenido celular puede ser de homogéneo a ligeramente granular. El diámetro de las células va de los 4 a 5 μm y de los 3 a 4 μm de largo.

Chroococcus cf. *thermalis*. Fig. 40. Muestra MT8

Colonias formadas por pocas células (2 a 4 células), encerradas en un mucílago transparente de 2 a 4 μm de espesor, homogéneo, cuando hay más de dos células se ve lamelado, que adquiere la forma de las células, en ocasiones no es visible. Generalmente mezcladas con otras especies, raramente se encuentran solitarias. Células de color verde-azul brillante, a veces ligeramente opacas, con contenido granular de 11 a 16 μm de diámetro y de 5 a 14 μm de largo.

Leptolyngbya sp. Fig. 41. Muestras MT2, MT3, MT4, MT5, MT8, MT9, MT10, MT11, MT12 y MT13.

Tricomas muy delgados, agregados, con vaina no visible al microscopio óptico de color verde grisáceo opaco. Células comúnmente más largas que anchas de 0.7 a 1.4 μm de ancho por 1 a 4 μm de largo. Contenido celular homogéneo con presencia de algunos gránulos. Las células apicales generalmente ligeramente redondeadas. El contenido celular es homogéneo o ligeramente granular.

Mastigocladus cf. laminosus. Fig. 42. Muestra MT13.

Tricomatos gruesos de color verde-azul con vaina visiblemente delgada. Poco abundantes, con células constreñidas y presencia de ramificaciones verdaderas, a veces atenuados en el extremo. Células de color verde-azul con contenido celular homogéneo, en ocasiones con algunos gránulos dispuestos de forma aleatoria, generalmente más largas que anchas, de 2 a 6 μm de ancho y de 4 a 9 μm de largo, redondeadas, a veces de formas irregulares, sobre todo en las partes donde existen o se forman ramificaciones y algunas veces casi esféricas. Las células de las ramificaciones generalmente son atenuadas, redondeadas y más alargadas que las del tricoma de origen.

Nostoc sp. Fig. 43. Muestras MT6 y MT8.

Tricomatos de color verde-azul a verde opaco con vaina no visible al microscopio óptico, formados por células casi esféricas de 2.8 a 3.4 μm de ancho y de 2 a 5 μm de largo con presencia de heterocitos intercalares y apicales también casi esféricos de 3 a 4 μm de ancho y de 4 a 5 μm de largo, éstos crecimientos forman grandes agregados.

Phormidium boryanum. Fig. 44. Muestras MT2, MT3, MT5, MT8, MT12 y MT13.

Tricomatos generalmente solitarios, rara vez agregados, de color verde grisáceo y a veces violeta. Ligeramente atenuados y redondeados hacia los extremos, algunas veces sólo redondeados. Generalmente espiralados, con una distancia entre espirales de 39 a 55 μm . Los tricomas tienen de 4 a 7 μm de ancho. La vaina no es visible al microscopio de luz. Presencia de hormogonios. Células casi isodiamétricas con contenido celular generalmente granular. Las células apicales terminan en punta redondeada.

Phormidium sp. Fig. 45. Muestra MT8.

Tricomas no muy abundantes de color verde-azul con vaina no visible al microscopio óptico, curvados y atenuados en el ápice, formados por células generalmente más anchas que largas de 2.7 a 3.2 μm de ancho y 1 a 3 μm de largo, con contenido celular comúnmente homogéneo y a veces ligeramente granular.

Pseudoanabaena sp. Fig. 46. Muestras MT1, MT2, MT3, MT8, MT9, MT10 y MT11.

Tricomas agregados junto con otras especies, con vaina a veces no visible al microscopio óptico, de color verde-azul brillante a verde-azul opaco. Células constreñidas generalmente más largas que anchas, de 2 a 3 μm de largo por 1 a 1.3 μm de ancho, con contenido celular homogéneo. Cromatoplasma a veces visible.

Pseudoanabaena thermalis. Fig. 47. Muestras MT1, MT2, MT3, MT8, MT9, MT10, MT11, MT12 y MT13.

Células cilíndricas, generalmente más largas que anchas, ligeramente redondeadas en los extremos, de color verde-azul brillante, conectadas por puentes hialinos. Centrosoma y cromatoplasma bien diferenciados. Células apicales redondeadas. Filamentos con células de distintos tamaños, que van de 2 a 3 μm de ancho y de 3 a 7 μm de largo. De uno a dos aerotopos polares presentes cerca del centro. No atenuados hacia los extremos.

Synechococcus bigranulatus. Fig. 48. Muestras MT1, MT4 y MT5.

Células generalmente solitarias, a veces dos, de color verde pálido. Células alargadas comúnmente rectas, a veces ligeramente curvadas con polos

redondeados, ocasionalmente con gránulos polares, uno en cada extremo. El contenido celular es homogéneo y su tamaño va de 2 a 3 μm de ancho y de 4 a 8 μm de largo.

Synechococcus sp. Fig. 49. Muestras MT1, MT12 y MT13.

Células poco abundantes de forma ovalada de color verde-azul opaco, formando pares solitarios, con vaina ligeramente visible. El tamaño celular es de 1.8 a 2.4 μm de ancho y de 2.7 a 2.9 μm de largo y el contenido celular es homogéneo.

Synechocystis sp. Fig. 50. Muestras MT1, MT2, MT3, MT5, MT10, MT11, MT12 y MT13.

Células esféricas, solitarias o comúnmente dos juntas de 3 a 6 μm de diámetro de color verde pálido. Cuando las células están unidas, las células son achatadas del lado por donde se unen. El contenido celular es de homogéneo a ligeramente granular.

Clase Chlorophyceae

Oedogonium sp. Figs. 51-56. Muestras MT6 y MT7.

Talos filamentosos no ramificados, epifitos sobre el mismo *Oedogonium* sp., con células siempre dispuestas en hileras, más largas que anchas que, en su mayoría, presentan discos de crecimiento en la parte superior. La célula apical generalmente es redondeada, algunas veces termina en punta. Células vegetativas cilíndricas, generalmente hialinas. Célula basal comúnmente redondeada, sin llegar a ser esférica. Presencia de oogonios casi esféricos, con pared celular multilaminada. Las células basales miden de 12 a 16 μm de ancho y de 20 a 28 μm de largo; las células vegetativas de 8 a 23 μm de ancho y de 15 a 46 μm de largo y; los oogonios de 35 a 46 μm de ancho y de 37 a 51 μm de largo.

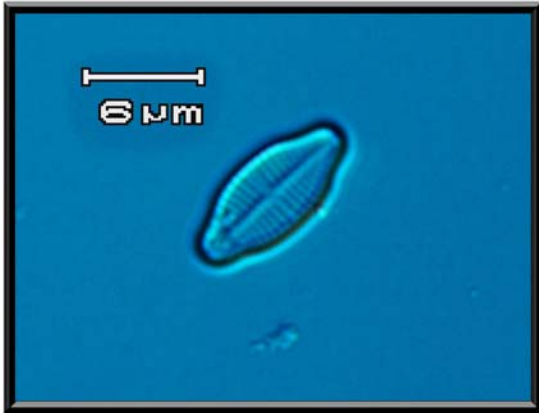


Fig. 15. *Achnanthes exigua*.



Fig. 16. *Amphora veneta*.

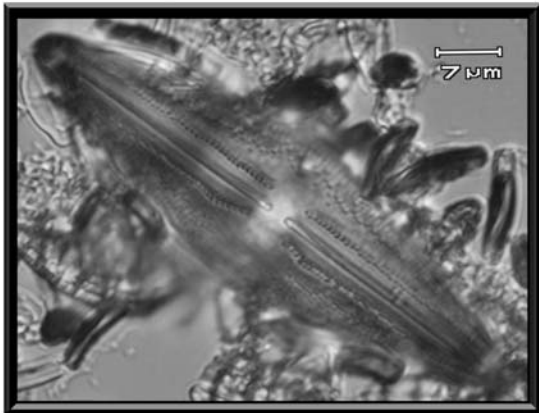


Fig. 17. *Anomoeoneis costata*.

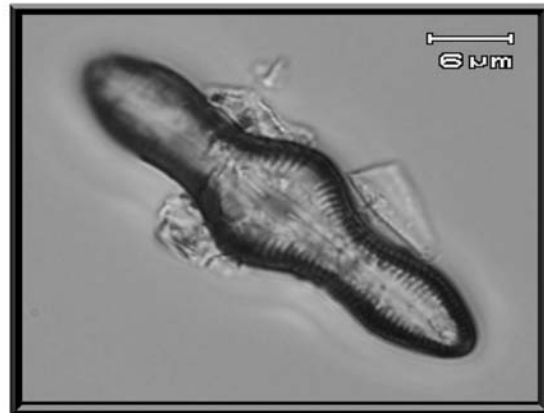


Fig. 18. *Caloneis silicula*.

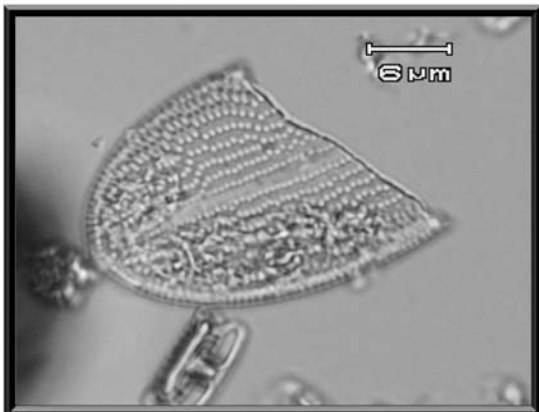


Fig. 19. *Cocconeis placentula*.

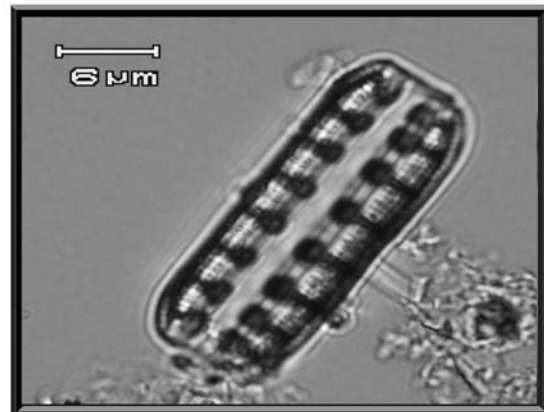


Fig. 20. *Denticula thermalis*.

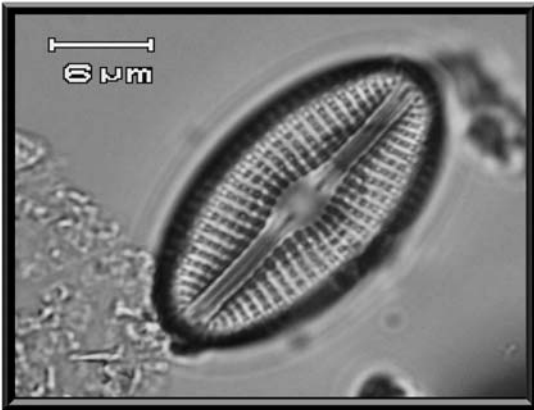


Fig. 21. *Diploneis elliptica*.



Fig. 22. *Epithemia turgida*.



Fig. 23. *Gomphonema gracile*.

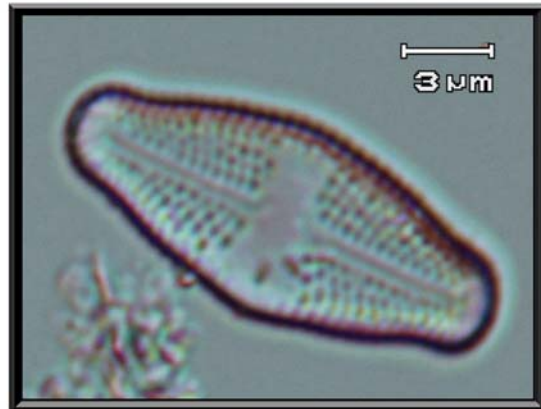


Fig. 24. *Luticola mutica*.

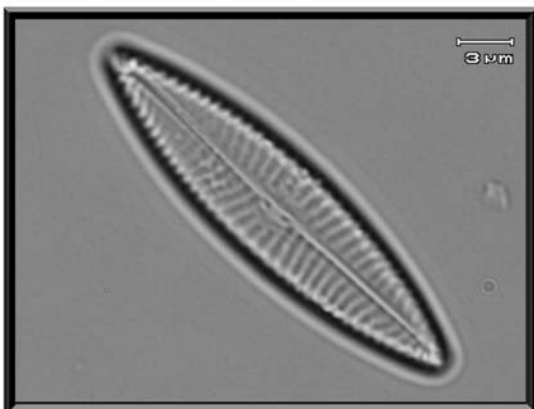


Fig. 25. *Navicula radiosa* var. *tenella*.

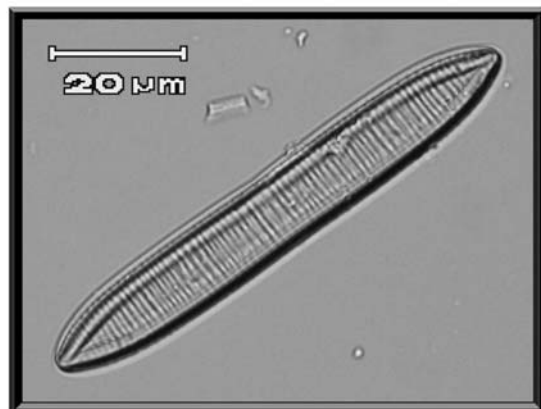


Fig. 26. *Nitzschia* aff. *calida*.

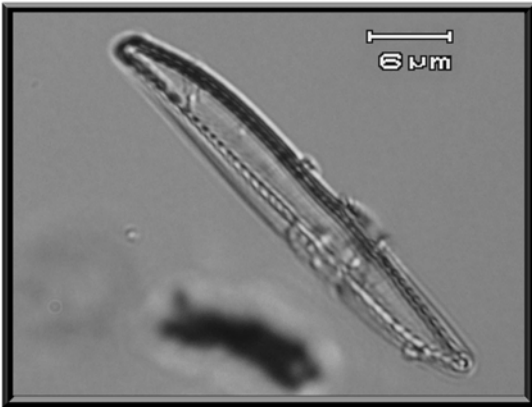


Fig. 27. *Nitzschia* aff. *clausii*.

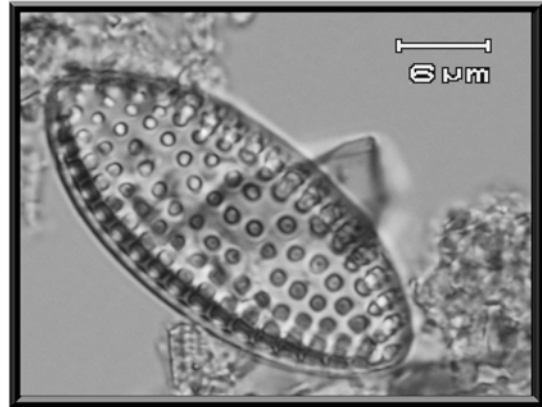


Fig. 28. *Nitzschia granulata*.

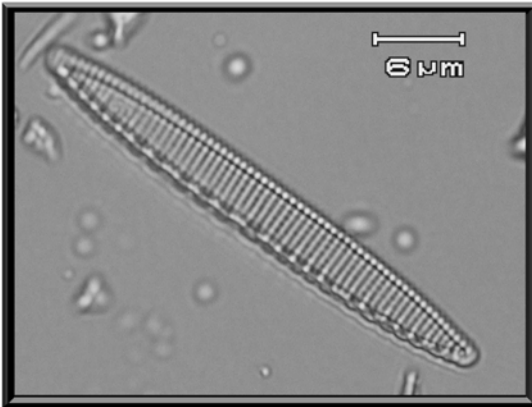


Fig. 29. *Nitzschia hantzschiana*.



Fig. 30. *Nitzschia inconspicua*.

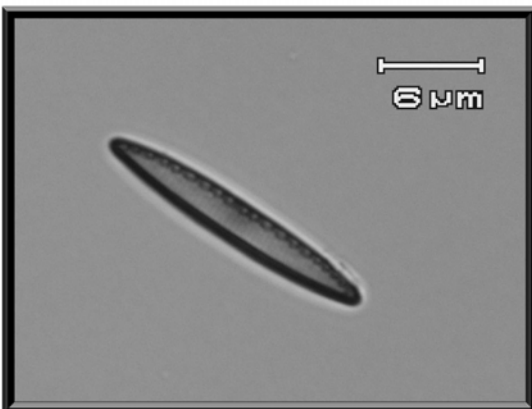


Fig. 31. *Nitzschia* sp.

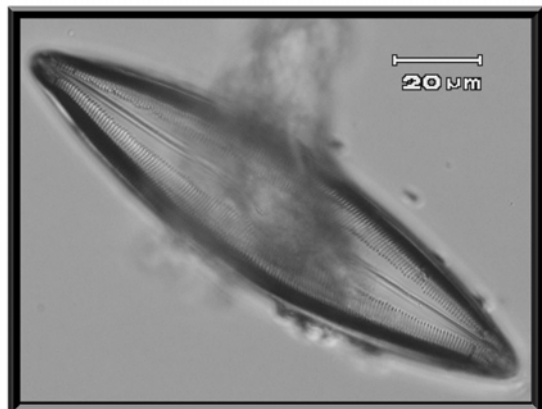


Fig. 32. *Pinnularia* sp.

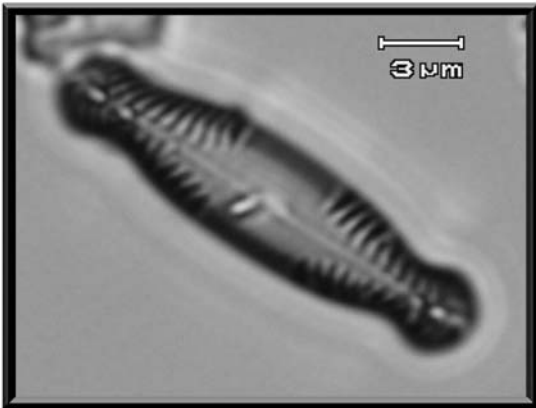


Fig. 33. *Pinnularia termitita*.

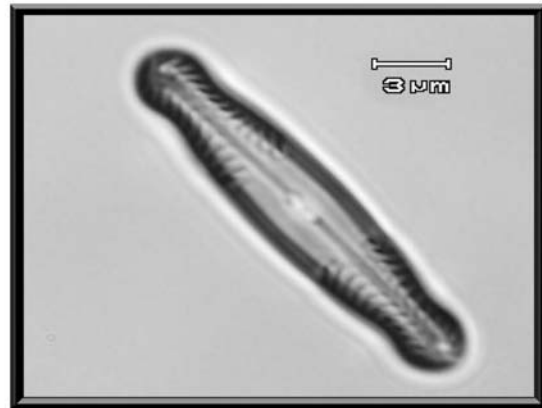


Fig. 34. *Pinnularia termitita*.



Fig. 35. *Pinnularia viridis*.

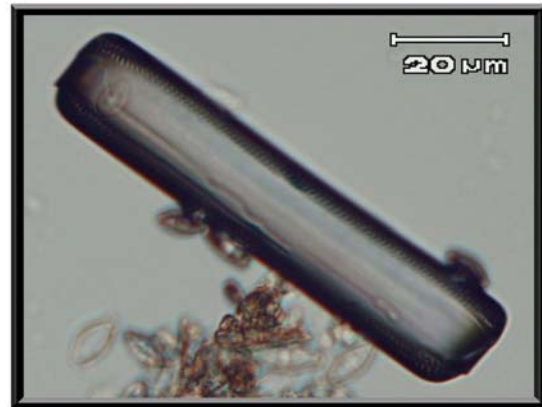


Fig. 36. *Pinnularia viridis*.

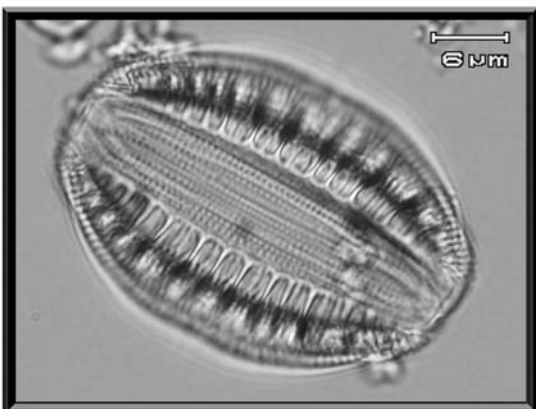


Fig. 37. *Rhopalodia gibberula*.



Fig. 38. *Rhopalodia gibberula*.

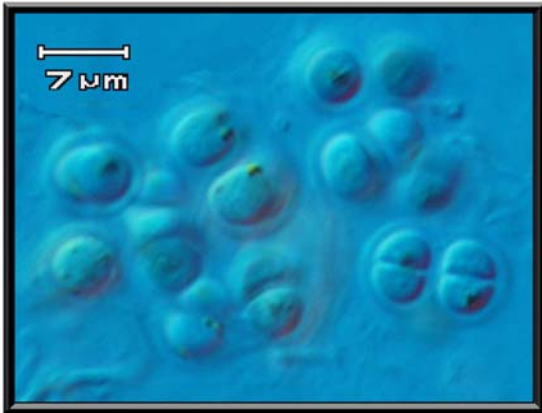


Fig. 39. *Chroococcus* sp.

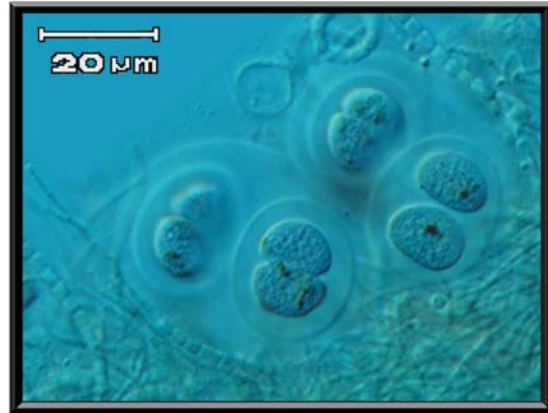


Fig. 40. *Chroococcus* cf. *thermalis*.

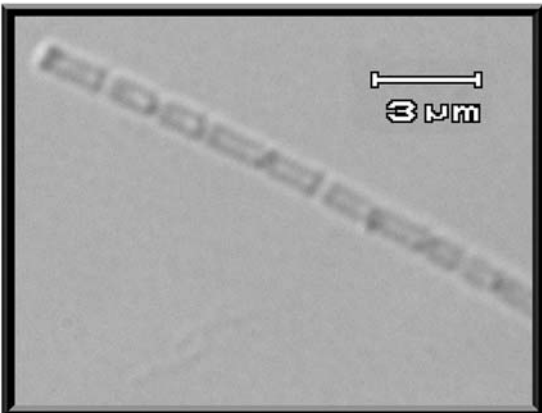


Fig. 41. *Leptolyngbya* sp.



Fig. 42. *Mastigocladus* cf. *laminosus*.

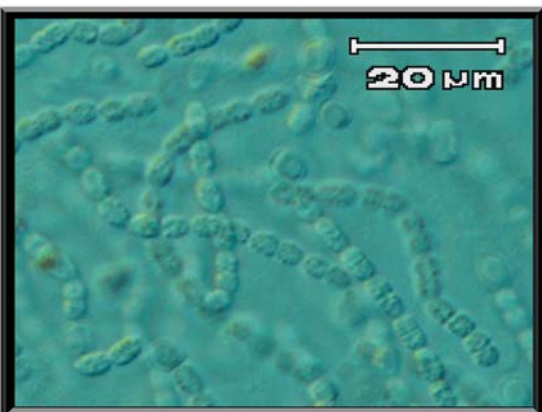


Fig. 43. *Nostoc* sp.



Fig. 44. *Phormidium* boryanum.



Fig. 45. *Phormidium* sp.



Fig. 46. *Pseudoanabaena* sp.

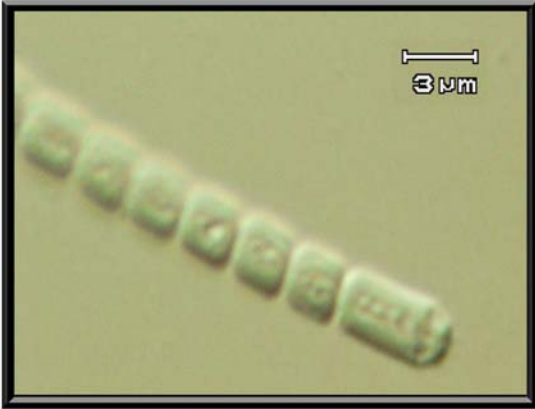


Fig. 47. *Pseudoanabaena thermalis*.

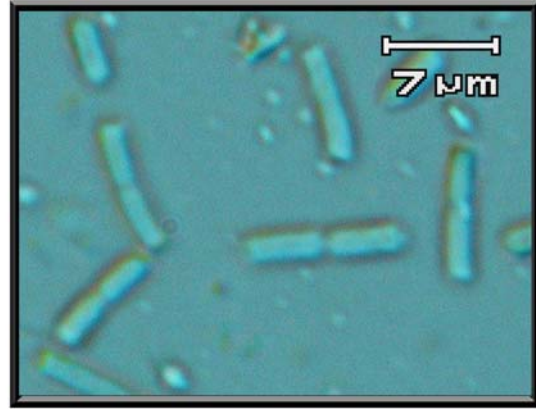


Fig. 48. *Synechococcus bigranulatus*.

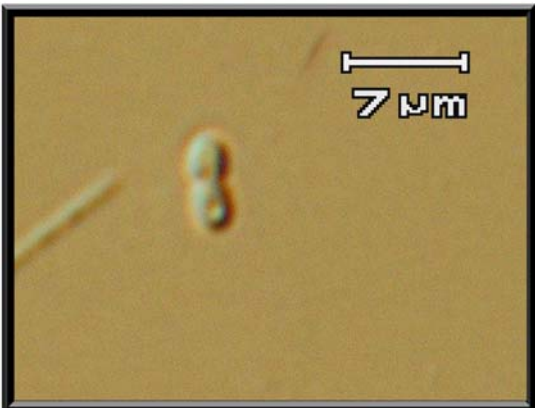


Fig. 49. *Synechococcus* sp.



Fig. 50. *Synechocystis* sp.

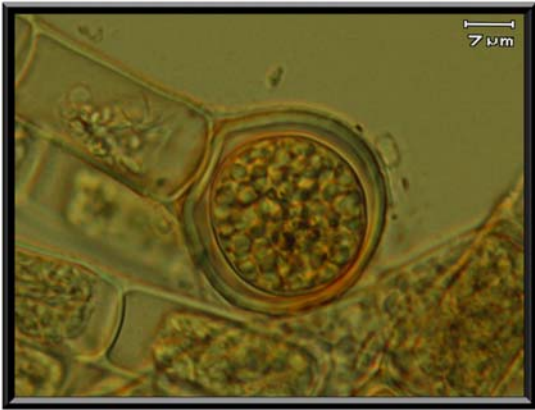


Fig. 51. *Oedogonium* sp.

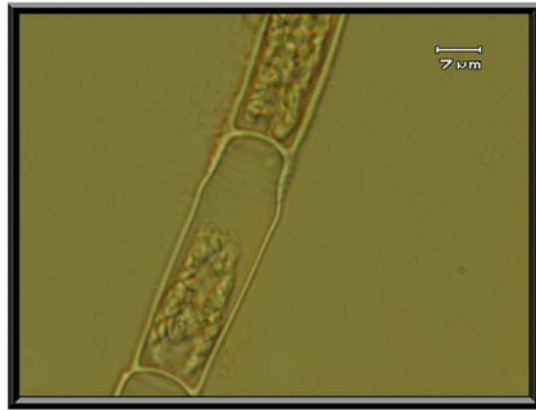


Fig. 52. *Oedogonium* sp.

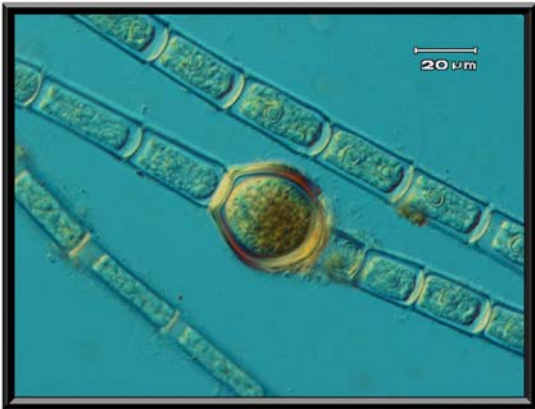


Fig. 53. *Oedogonium* sp.

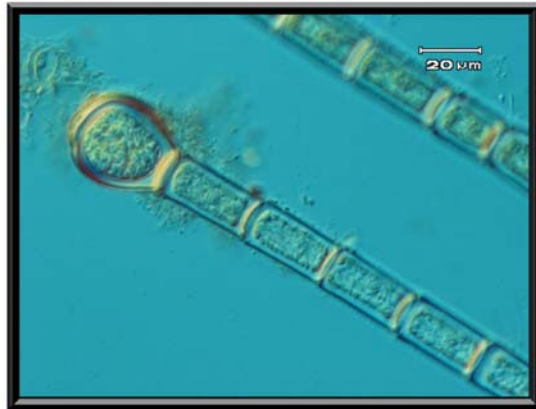


Fig. 54. *Oedogonium* sp.

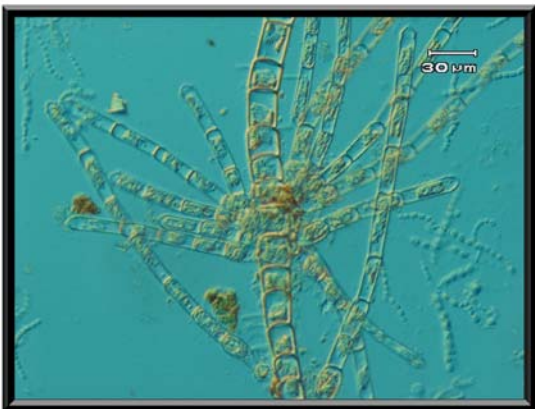


Fig. 55. *Oedogonium* sp.

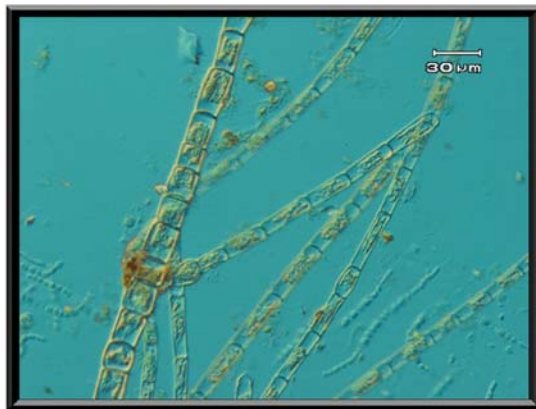


Fig. 56. *Oedogonium* sp.

DISCUSIÓN

El principal factor que afectó la distribución de las especies de algas en el manantial Los Hervideros fue la temperatura. Si bien las conductividades encontradas fueron elevadas, en comparación con las de otros cuerpos de agua continentales, lo que refleja una elevada salinidad, esta fue menor que la del mar, por lo que se le puede considerar un ambiente salobre o salino, pero no extremo. Esto explica la presencia de especies consideradas eurihalinas como *Amphora veneta*, que se encuentra comúnmente en ambientes marinos o salobres; *Diploneis elliptica*, que se ha encontrado en regiones cercanas al mar y *Luticola mutica* y *Navicula aff. clausii*, que se les considera de aguas salobres (Germain, 1981).

El pH en Los Hervideros fue relativamente homogéneo variando de 7.5 a 8, por lo que consideramos que no tuvo efecto sobre la distribución de las algas en el manantial.

Las temperaturas de Los Hervideros fueron similares a las encontradas en otros manantiales termales como Yellowstone, E. U., en donde se ha encontrado que varían de 22 a 114 °C (Copeland 1936).

La mayor temperatura a la que se encontraron crecimientos algales en este manantial fue de 83.4 °C. Es importante mencionar que la temperatura más alta a la que se considera posible la fotosíntesis es de 74 °C (Madigan, *et al.*, 2001). Aunque el crecimiento aquí encontrado fue pequeño, en comparación con los tapetes desarrollados a menores temperaturas, presentó coloración y apariencia similares. El crecimiento estuvo constituido por *Leptolyngbya* sp. y *Synechococcus bigranulatus*. No obstante, que en apariencia el material pareció metabólicamente activo, es necesario comprobar la tolerancia y viabilidad del material a estas temperaturas. En el caso de las diatomeas encontradas en este crecimiento y a esta temperatura, lo más probable es que se trate sólo de frústulos inertes, en virtud de que se considera que el límite máximo de temperatura para eucariontes fotosintéticos es de 60 °C (Madigan *et al.*, 2001). Probablemente, debido a la resistencia de los frústulos, éstas hayan sido transportadas a tal sitio.

Entre los 70.8 y los 76 °C sólo fueron visibles crecimientos de cianofitas, notándose claramente más grandes que los hallados en la temperatura más alta. Estos estuvieron constituidos por *Leptolyngbya* sp., *Phormidium boryanum*, *Pseudoanabaena* sp. *Pseudoanabaena thermalis*, *Synechococcus bigranulatus* y *Synechocystis* sp., lo que indica un aumento tanto en el número de especies como en la abundancia de crecimientos.

En las temperaturas de los 54.7 a los 61 °C se presentaron tapetes algales formados principalmente por *Phormidium boryanum*. En temperaturas cercanas a los 55 °C se presentaron algunas especies de diatomeas asociadas con estos tapetes. Es importante mencionar que no se encontraron crecimientos importantes de *P. boryanum* por arriba de los 61 °C.

El mayor número de especies se presentó en los 47 °C, en su mayoría fueron diatomeas. Esta muestra fue recolectada con parte del sustrato, y al observarla al microscopio se pudo ver que no todas las diatomeas aquí presentes tenían contenido, por lo que podríamos suponer que algunas no pertenecían a este sitio. La localidad de estudio se encuentra sobre un lugar que al parecer fue un lago, ya que parte del sustrato está constituido por depósitos lacustres (Tovar-Aguado & García-Estrada, 1991), por lo que posiblemente las especies sin contenido pudieron haber pertenecido a la antigua flora de este lugar y pudieron haberse sedimentado o ser acarreadas a tal sitio.

Entre los 30.4 y los 35.5 °C se presentó *Oedogonium* sp., que fue muy abundante en temperaturas cercanas a los 35 °C. También se encontraron talos de *Nostoc* sp. mezclados. En la temperatura más baja del gradiente (22.2 °C), sólo encontramos cianofitas y diatomeas, destacando la presencia de algunas especies que solo fueron observadas aquí, que fueron: *Chroococcus* cf. *thermalis*, que ha sido reportada en temperaturas mayores a 36 °C (Komárek & Anagnostidis, 2005), *Chroococcus* sp. y *Phormidium* sp., creciendo entremezcladas con algunas otras cianofitas y diatomeas, que se presentaron en menor proporción.

El manantial de Los Hervideros cuenta con varios puntos que vierten agua caliente a lo largo del cauce, por lo que la temperatura fue muy variable, e incluso se notaron cambios en pocos centímetros. Debido a esta heterogeneidad de las

temperaturas a lo largo del mismo fue difícil agrupar a las especies encontradas como mesófilas, termófilas o extremófilas, ya que los intervalos de tolerancia a la temperatura de las especies se traslaparon, igual a los establecidos por Jjemba (2004).

En base a lo discutido anteriormente, consideramos que la variación espacial de las especies en Los Hervideros estuvo relacionada con la temperatura.

Las especies con mayor tolerancia a la temperatura fueron: *Denticula thermalis*, *Nitzschia granulata*, *Pinnularia termitita*, *Rhopalodia gibberula*, *Leptolyngbya* sp., y *Synechococcus bigranulatus*, encontradas a una temperatura máxima de 83.4 °C, y *Pseudoanabaena thermalis* y *Synechocystis* sp. hallados en el límite superior de 76 °C.

Como casos particulares, se encontraron especies que consideramos como raras, ya que no se localizaron más de 5 ejemplares en las preparaciones analizadas, como es el caso de *Anomoeoneis costata* (2 ejemplares), de los cuales sólo a uno de ellos se le pudieron contar las estrías, pues se encontraba mezclados con sedimentos y otras diatomeas; *Cocconeis placentula* (5 ejemplares); *Caloneis silicula* (1 ejemplar); *Epithemia turgida* (5 ejemplares); *Nitzschia* aff. *clausii* (3 ejemplares) y *Pinnularia* sp. (2 ejemplares), a pesar del número reducido de ejemplares se determinaron como tales especies por las medidas y morfología observadas. En algunos casos fueron contadas de diferentes preparaciones.

En Los Hervideros encontramos 4 especies en común a las que se han reportado para manantiales termales en el norte de Tailandia, que son: *Chroococcus thermalis*, *Mastigocladus laminosus*, *Phormidium boryanum* y *Synechococcus bigranulatus*, encontradas a temperaturas de entre 30 y 80 °C (Sompong *et al.*, 2005); 1 en común reportada en Yellowstone, EUA: *Mastigocladus laminosus* localizada entre 29 y 56 °C (Copeland, 1936); 1 en Grecia: *Phormidium boryanum* (Anagnostidis *et al.*, 1988) y; 1 reportada en las islas Sándwich, en el mar Atlántico: *Luticola mutica*, de la cual no se menciona la temperatura en la que se encontró (Convey, 2000). De las cuales no se tenía registro para México, aunque si existe reportada otra especie, que no se encuentra

en Los Hervideros, sin embargo, fue reportada para Baja California, *Phormidium valderanium* (Delph.) Gomont, a 75 °C (Copeland, 1936).

Finalmente, consideramos que el número de especies encontrado es elevado en relación con el área, el número de muestras y el tipo de ambiente estudiado.

CONCLUSIONES

- El manantial Los Hervideros presentó características similares a las de otros manantiales termales, con temperaturas de hasta 85.2 °C.
- Los grupos algales dominantes fueron las diatomeas y las cianofitas.
- Como grupo, las cianofitas presentaron la mayor tolerancia a la temperatura.
- La mayor diversidad de especies estuvo dada por las diatomeas.
- En este manantial existe una relación clara entre la distribución de las especies y la temperatura.
- Las especies de cianofitas más abundantes de la localidad tienen preferencia por las altas temperaturas, ya que el mayor número se presentó en el intervalo de los 54.7 a los 76 °C.
- *Oedogonium* sp. presentó límites de tolerancia bajos y sólo se desarrolló en temperaturas menores a los 35.5 °C.
- La salinidad fue un factor que influyó en el tipo de flora, al encontrarse especies características de ambientes salinos y/o salobres.
- El pH no fue un factor determinante en la distribución de las algas de este manantial.

LITERATURA CITADA

- Alonso-Reyes, F. 1997. *Sistemas Geotérmicos de roca seca y caliente (Una fuente de energía no convencional)*. Colección Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Anagnostidis, K., A. Economou-Amilli & K. Makris. 1988. *On the morphotypes of Phormidium boryanum (Bory ex Gom.) Anagn. et Kom. And Phormidium janthiphorum (Fior.-Mazz. ex Gom.) Elenk. A taxonomic consideration.* En: Elster, H. J. & W. Ohle. 1988. *Archiv Für Hydrobiologie*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Germany.
- Atlas, R. M. & R. Bartha. 2002. *Ecología microbiana y Microbiología ambiental*. Addison Wesley. España.
- Brock, T. D. 1974. *Biology of microorganisms*. Prentice-Hall. U. S. A.
- Brock, T. D. 1978. *Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures*. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin. U. S. A.
- Castenholz, R. & Wickstrom. 1975. *Thermal Streams*. En: Whitton, B. A. 1975. *River Ecology*. Blackwell Scientific Publications. Great Britain.
- Convey, P., R. I. Lewis Smith, D. A. Hodgson & H. J. Peat. 2000. *The flora of the South Sandwich Islands, with particular reference to the influence of geothermal heating*. *Journal of Biogeography*. Vol. 27. pp. 1279 – 1295.
- Copeland, J. J. 1936. *Yellowstone thermal Myxophyceae*. *Annals N. Y. Acad. Sci.* Vol. 36. pp. 1-232.
- Dodds, W. K. 2002. *Freshwater Ecology, Concepts and Environmental Applications*. Academic Press. U. S. A.
- Germain, H. 1981. *Flore des Diatomées*. Société Nouvelle des Éditions Boubeé. Paris.
- Graham, L. E. & L. W. Wilcox. 2000. *Algae*. Prentice Hall. U. S. A.
- Horikoshi, K. & W. D. Grant. 1998. *Extremophiles: Microbial life in Extreme Environments*. Wiley-Liss. U. S. A.
- INEGI, 2005. *En.* www.inegi.gob.mx

- Jjemba, P. K. 2004. *Environmental Microbiology, principles and applications*. Science Publishers, Inc. India.
- Komárek, J. & K. Anagnostidis. 1998. 19/1. *Cyanoprokariota*. 1. Teil: *Chroococcales*. En: Ettl, H., G. Gärtner, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds.). *SüBwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer. Germany. 643 Figures. 548 pp.
- Komárek, J. & K. Anagnostidis. 2005. 19/2. *Cyanoprokariota*. 2. Teil: *Oscillatoriales*. En: Bedel, B., G. Gärtner, L. Krienitz & M. Schagerl (Eds.) *SüBwasserflora von Mitteleuropa*. ELSEVIER. Italy. 1010 Figures. 759 pp.
- Kramer K. & H. Lange-Bertalot. 1986. 2/1. *Bacillariophyceae*. 1. Teil: *Naviculaceae*. En: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds.). *SüBwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany. 206 Talfeln mit 2976 Figuren. 876 pp.
- Kramer K. & H. Lange-Bertalot. 1988. 2/2. *Bacillariophyceae*. 2. Teil: *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. En: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds.). *SüBwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany. 184 Talfeln mit 1914 Figuren. 596 pp.
- Kramer K. & H. Lange-Bertalot. 1991b. 2/4. *Bacillariophyceae*. 4. Teil: *Achnantheaceae*. Kristische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema*. En: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds.). *SüBwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany. 88 Talfeln mit 2048 Figuren. 437 pp.
- Lee, R. E. 1999. *Phycology*. Cambridge University Press. U. K.
- Madigan, T. M., J. M. Martinko & J. Parker. 2001. *Brock Biología de los Microorganismos*. Prentice Hall. España.
- Meeks, J. C. & R. W. Castenholz. 1971. *Growth and Photosynthesis in an Extreme Thermophile, Synechococcus lividus (Cyanophyta)*. Arch. Mikrobiol. Vol. 78. pp. 25-41.
- Mrozinska, T. 1985. 14. *Chlorophyta. Oedogoniophyceae: Oedogoniales*. En: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds.). *SüBwasserflora von*

- Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York. 1000 Figuren. 624 pp.
- Pantoja-Alor, J. & A. Gómez-Caballero. 2000. *Géiseres y manantiales termales de México*. Ciencias. Vol. 59. pp. 23-25.
- Pantoja-Alor, J. & A. Gómez-Caballero. 2004. *Los sistemas hidrotermales y el origen de la vida*. Ciencias. Vol. 75. pp. 14-22.
- Ramírez-Domínguez, E., M. P. Verma, D. Nieva, J. L. Quijano & J. Moreno. 1988. *Ebullición y Mezcla en Procesos de Formación de Fuentes Termales en los Azufres, Mich.* Geotermia. Vol. 4. No. 2, pp. 59-77.
- Sompong, U., P. R. Hawkins, C. Besley & Y. Peerapornpisal. 2005. *The distribution of cyanobacteria across physical and chemical gradients in hot springs in northern Thailand*. FEMS Microbiology Ecology. Vol. 52. pp. 365-376.
- St. Clair, L. L. & S. R. Rushforth. (1976). *The diatom flora of Timpanogos Cave National Monument, Utha*. Amer. J. Bot. Vol. 63, pp. 49-59.
- Stetter, K. O. 2001. *Microorganisms in High-temperature Sulfur Environments*. ENCYCLOPEDIA OF LIFE SCIENCES.
- Tovar Aguado, R. & G. H. García Estrada. 1991. *Evaluación de la Descarga Superficial en la Zona Geotérmica de Araró, Mich.* Geotermia. Vol. 7. No. 2, pp. 117-143.
- Zaragoza R., M. A. & M. R. Mora-Navarro. 2006. *Cianofitas del Río Caliente del Bosque La Primavera*. En: Mora-Navarro, M. R. et al. 2006. *Algas del Occidente de México: Florística y Ecología*. Universidad de Guadalajara (CUCBA). México.

ANEXO I

Gelatina Glicerizada

Preparación de la gelatina glicerizada:

1. Agregar 100 ml de agua en un recipiente, calentando a baño maría.
2. Pesar 15 gr de gelatina y agregarlos al agua.
3. Agitar hasta que se disuelva la gelatina.
4. Una vez disuelta la gelatina, agregar 34.5 ml de glicerina.
5. Por último agregar 1.5 gr de fenol y mezclar perfectamente.
6. Una vez hecha la mezcla, filtrar y dejar enfriar.

Preparaciones semipermanentes

Para hacer las preparaciones, se pone una pequeña parte de la muestra en un portaobjetos, tratando de que no tenga mucha agua, sin dejar que se seque. Después, con la gelatina en estado líquido, sin que se sobrecaliente, se le agregan dos gotas a la muestra. A continuación se le pone el cubreobjetos y se deja enfriar y que solidifique la gelatina por 24 horas. Terminado este proceso, se sellan las preparaciones con barniz de uñas transparente para evitar que se reseque la gelatina y dar mayor vida, aplicándolo en el margen del cubreobjetos.

ANEXO II

Limpieza de Diatomeas

Técnica de limpieza utilizada para diatomea (St. Clair & Rushforth, 1976).

1. Pesar y/o medir las muestras.
2. Colocar en matraces de 100 ml.
3. Añadir 20 ml de agua destilada.
4. Añadir 10 ml de ácido nítrico.
5. Calentar lentamente y hervir hasta que disminuya el líquido a 20 ml, pero evitar un calentamiento que salpique la muestra.
6. Añadir un poco de dicromato de potasio y hervir 5 minutos más.
7. Enfriar a temperatura ambiente.
8. Colocar las muestras en tubos de centrifuga hasta los 14 ml. Centrifugar cada vez por 10 minutos.
9. Resuspender la muestra hasta que se vea homogénea.
10. Centrifugar y decantar 6 veces y después de la última, llenar a 10 ml en vez de 14 ml.
11. Hacer las preparaciones (poner las diatomeas en cubreobjetos y secar en parrilla).
12. Colocar Naphrax® en un portaobjetos (añadir un poco de tolueno como solvente a la resina).
13. Calentar hasta que el Naphrax® se licue por 3 segundos. Cuidar que salgan los vapores del portaobjetos.
14. Inmediatamente después de remover el portaobjetos del calor, colocar un cubreobjetos con las diatomeas en la resina caliente. El Naphrax® hervirá un poco más. Colocar el portaobjetos en la parrilla para que la resina hierva nuevamente y remover tan pronto ocurra.
15. Eliminar las burbujas.

ANEXO III
Relación especie/muestra

Especie	Muestra/Temperatura (° C)												
	MT1 47	MT2 47	MT3 58	MT4 83.4	MT5 76	MT6 35.5	MT7 30.4	MT8 22.2	MT9 22.2	MT10 73	MT11 61	MT12 54.7	MT13 54.7
<i>Achnanthes exigua</i>	X			X			X	X					
<i>Amphora veneta</i>	X												
<i>Anomoeoneis costata</i>	X												
<i>Caloneis silicula</i>	X												
<i>Chroococcus</i> cf. <i>thermalis</i>								X					
<i>Chroococcus</i> sp.								X					
<i>Cocconeis placentula</i>	X												
<i>Denticula thermalis</i>	X			X				X					X
<i>Diploneis elliptica</i>	X							X					
<i>Epithemia turgida</i>	X			X									
<i>Gomphonema gracile</i>	X			X									
<i>Leptolyngbya</i> sp.		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X
<i>Luticula mutica</i>	X												
<i>Mastigocladus</i> cf. <i>laminosus</i>													X
<i>Navicula radiosa</i> var. <i>tenella</i>	X			X			X						
<i>Nitzschia</i> aff. <i>calida</i>	X						X	X					X
<i>Nitzschia</i> aff. <i>clausii</i>	X							X					X
<i>Nitzschia granulata</i>	X							X					X
<i>Nitzschia hantzschiana</i>	X							X					
<i>Nitzschia inconspicua</i>	X												
<i>Nitzschia</i> sp.	X												
<i>Nostoc</i> sp.						X		X					
<i>Oedogonium</i> sp.						X	X						
<i>Phormidium boryanum</i>		X	X		X			X				X	X
<i>Phormidium</i> sp.								X					
<i>Pinnularia</i> sp.	X			X									
<i>Pinnularia termitina</i>	X			X									
<i>Pinnularia viridis</i>	X							X					
<i>Pseudoanabaena</i> sp.	X	X	X					X	X	X	X		
<i>Pseudoanabaena thermalis</i>	X	X	X					X	X	X	X	X	X
<i>Rhopalodia gibberula</i>	X			X									
<i>Synechococcus bigranulatus</i>	X			X	X								
<i>Synechococcus</i> sp.	X											X	X
<i>Synechocystis</i> sp.	X	X	X		X					X	X	X	X