

Análisis de la Diversidad de Microorganismos aislados de Zonas Geotérmicas

Márquez Gámez Miriam del Carmen¹, Huerta Martínez Fernando¹, García Sánchez Isai¹, Segura Bustos Andrea Iveth¹, Ávila Hernández César Yahir¹, Noriega Luna Berenice¹

¹Universidad de Guanajuato
berenice.noriega@correo.mx¹

Resumen

Las aguas termales son entornos geotérmicos que albergan microorganismos que incluyen miembros de los tres dominios de la vida, Archaea, Bacteria y Eukarya. El estudio de estos microorganismos se ha convertido en un campo de investigación importante debido a su potencial para producir enzimas termoestables de interés industrial (proteasas, amilasas, lipasas, xilanasas y ADN polimerasas) y exopolisacáridos que funcionan en condiciones extremas. Los organismos termófilos crecen en un número limitado de lugares, y la exploración de estos microorganismos en entornos geotérmicos no sólo ha proporcionado una mayor comprensión del origen y la evolución de la vida más temprana, sino que también ha dado acceso a importantes recursos biológicos con aplicaciones potenciales en la industria alimentaria y biotecnológica. Por otro lado, las investigaciones sistemáticas sobre la fisiología y la genética de las especies de diatomeas que son capaces de vivir en los hábitats extremos son recientes y aún es demasiado pronto para determinar en qué medida estas especies extremófilas han adoptado una fisiología especial para hacer frente a las circunstancias especiales y si esto es coherente con las especies de diferentes géneros que se desarrollan en estos entornos tan extremos. Sin embargo, en los últimos años, las diatomeas han sido estudiadas no sólo desde el punto de vista académico sino también dentro de las aplicaciones industriales y biotecnológicas, prueba de ello son las aplicaciones que se les ha dado dentro del sector industrial y comercial, como la síntesis de combustibles, la síntesis de productos farmacéuticos, la síntesis de biomoléculas, la síntesis de materiales de interés para la nanotecnología y en la biorremediación de aguas contaminadas, en la biomonitorización, en la paleoecología y en los análisis forenses, que pueden combinarse en un futuro próximo para hacer de las diatomeas una fuente rentable de sustancias novedosas con amplia relevancia. Por lo tanto, el objetivo de este artículo es realizar una revisión del estado actual sobre el aislamiento e identificación de organismos y microorganismos en zonas geotérmicas a nivel mundial.

Palabras clave: fuentes termales; microorganismos termófilos; diatomeas; aplicaciones industriales y biotecnológicas.

Abstract

Hot springs are geothermal environments that harbor microorganisms that include members of the three domains of life, Archaea, Bacteria and Eukarya. The study of these microorganisms has become an important field of research because of their potential to produce thermostable enzymes of industrial interest (proteases, amylases, lipases, xylanases and DNA polymerases) and exopolysaccharides that function under extreme conditions. Thermophilic organisms grow in a limited number of locations, and the exploration of these microorganisms in geothermal environments has not only provided a greater understanding of the origin and evolution of the earliest life, but has also provided access to important biological resources with potential applications in the food and biotechnology industries. On the other hand, systematic investigations on the physiology and genetics of diatom species that are capable of living in extreme habitats are recent and it is still too early to determine to what extent these extremophilic species have adopted a special physiology to cope with the special circumstances and whether this is consistent with species of different genera evolving in such extreme environments. However, in recent years, diatoms have been studied not only from an academic point of view but also within industrial and biotechnological applications, proof of this are the applications given to them within the industrial and commercial sector, such as fuel synthesis, synthesis of pharmaceuticals, the synthesis of biomolecules, the synthesis of materials of interest for nanotechnology and in the bioremediation of contaminated waters, in biomonitoring, in paleoecology and in forensic analysis, which may combine in the near future to make diatoms a cost-effective source of novel substances with broad relevance. Therefore, the aim of this article is to review the current status of the isolation and identification of organisms and microorganisms in geothermal areas worldwide.

Keywords: hot springs; thermophilic microorganisms; diatoms; industrial and biotechnological applications.

Introducción

Aguas termales

Las aguas termales surgen de la tierra con una temperatura mayor a los 5°C, que es la temperatura de la superficie terrestre, esto se debe a que estas aguas a cierta profundidad se encuentran a mayor temperatura y salen en forma de vapor y al llegar a la superficie se condensan y forman los manantiales de agua caliente. Estas aguas que provienen del subsuelo arrastran consigo una serie de minerales por lo que se considera que estas aguas tienen efectos medicinales (Calero, 2015).

Las aguas termales se asocian con volcanismo terciario o con fallas y plegamientos geológicamente recientes, y generalmente presentan temperaturas cercanas de los 100 °C. El primer requisito para la formación de un sistema de aguas termales es un depósito de rocas porosas y permeables. Las rocas de depósito son principalmente la arenisca, la caliza y el granito. Las lutitas y las limolitas son impermeables y, por lo tanto, forman barreras para el flujo de agua. Los factores que participan en la formación de manantiales termales son la topografía (la disposición del terreno) y la estratigrafía (la disposición de las rocas del subsuelo). Cuando una capa de roca impermeable (estrato) impide la percolación del agua hacia abajo de una roca de depósito, y una depresión topográfica proporciona un escape superficial, se produce un manantial normal. Las aguas termales se calientan por el incremento de la temperatura en la profundidad de la tierra, esta tasa, llamada gradiente geotérmico, puede variar mucho de un lugar a otro, se ve afectado por el flujo de calor de la subcorteza terrestre, el calentamiento radial dentro de las rocas, la conductividad de las rocas y la estructura geológica (Figura 1) (Miller, 1978).

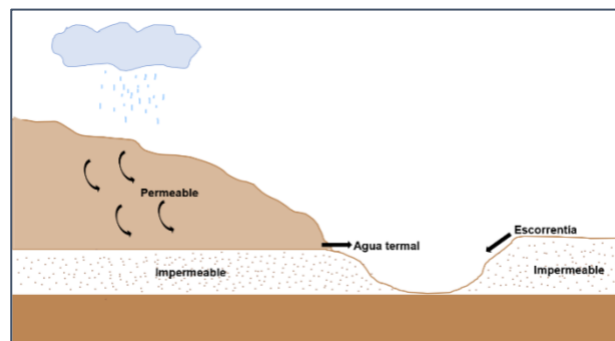


Figura 1. Sistema de aguas termales (Miller, 1978).

Las aguas de los manantiales tienen diferente composición química. Las aguas termales conservan restos fósiles de microbios, residuos de árboles y animales macroscópicos (Miller, 1978). La composición y geometría de los depósitos de aguas termales se definen por la composición de los fluidos hidrotermales ascendentes, por la temperatura, por las interacciones agua-gas entre las rocas, por las precipitaciones minerales y los procesos asociados con la deposición de sínteres silíceos (des Marais & Walter, 2019; González-Guzmán et al., 2019).

Los fluidos hidrotermales pueden agruparse en categorías de acuerdo a los compuestos formados (Drake et al., 2014). Los fluidos de cloruros alcalinos se forman cuando el agua subterránea y los gases volcánicos (p. ej., CO₂, H₂S) interactúan con las rocas de silicato, al enfriarse estos fluidos forman depósitos de sínteres silíceos (ópalo-A: SiO₂·nH₂O) (White et al., 1964). Los fluidos de sulfatos ácidos se forman cuando el H₂S ascendente se oxida para formar H₂SO₄, que posteriormente reacciona con las rocas circundantes, generando minerales de alteración como arcillas, óxidos y residuos de sílice (Schinteie et al., 2007). Los fluidos de sulfatos ácidos también pueden mezclarse con fluidos de cloruros alcalinos y formar sinterizados ácidos, pero estos depósitos son generalmente menos comunes y más delgados que los depósitos derivados principalmente de fluidos de cloruros alcalinos (Drake et al., 2014). Los fluidos ricos en bicarbonatos surgen cuando los gases volcánicos y el agua subterránea interactúan con las rocas carbonatadas y pueden generar depósitos de travertino (CaCO₃) (Fouke et al., 2000). Los manantiales ricos en hierro albergan comunidades microbianas (Parenteau y Cady, 2010) y crean abundantes depósitos floculantes que contienen hierro. Existen diferentes criterios para clasificar las aguas termales, pero la mayoría concuerda que, para clasificar recursos geotérmicos, la temperatura del yacimiento debe ser el criterio principal (Tabla 1) (Subir, 2005).

Tabla 1. Clasificación de las aguas termales en función de la temperatura.

Clase	Temperatura (°C)
1	Menor a 100
2	100 a 150
3	150 a 190
4	190 a 230
5	230 a 300
6	Mayor a 300

Las aguas termales se consideran ambientes extremos para la supervivencia de los microorganismos por las condiciones de temperatura, pH, concentración de sales, acidez, alcalinidad, dureza, concentraciones de sólidos, entre otros factores que las hacen diferentes a otros hábitats, sin embargo, muchos microorganismos se han adaptado a estas condiciones de vida. Además, estos ecosistemas son ricos en nutrientes lo que permite el desarrollo de comunidades fotosintéticas (Fernández-Turiel et al., 2005). Asimismo, se ha encontrado el desarrollo de microorganismos en lugares en donde prevalece la oscuridad (Casterholz, 1969).

En estos ambientes también se ha reportado tanto la presencia de microorganismos autóctonos como de microorganismos alóctonos que proceden de otros hábitats. Estos ecosistemas son las principales manifestaciones superficiales de los sistemas geotérmicos que proveen información en cuanto a profundidad, entorno geológico, establecen el marco hidrológico general y definen algunos rasgos de su estructura tectónica superficial (Alfaro et al., 2003).

Microorganismos termófilos aislados de aguas termales

Los microorganismos termófilos son aquellos capaces de sobrevivir en ambientes cuyas temperaturas circundan entre los 60° y 80°C, pudiéndolos encontrar en terrenos que superen estas condiciones. Las características que poseen estos microorganismos, y que les permiten sobrevivir en estos entornos, incluyen la alta permeabilidad de su membrana celular, la estabilidad química de sus lípidos de membrana, la presencia de enzimas termoestables que participan en sus procesos metabólicos, entre otras. (Ríos Vázquez, 2019). Una manera de localizar a este tipo de microorganismos es a través de las zonas geotérmicas, o en aquellos espacios en donde coexista un flujo de calor de continuo (Ríos Vázquez, 2019), tal como lo son los yacimientos de aguas termales, geiseres, algunos complejos volcánicos, entre otros.

Las aguas termales poseen propiedades terapéuticas que brindan beneficios para el mejoramiento de la salud, incluso pueden usarse para fines recreativos. La mayoría de los microorganismos termófilos que habitan en estas aguas no representan un riesgo potencial para salud de las personas (Ríos Vázquez, 2019), sin embargo, es importante realizar una caracterización microbiológica, esto ayudaría no solo a identificar bacterias patógenas que impliquen afectaciones hacia el bienestar poblacional sino a reconocer, determinar y detallar aquellos microorganismos termófilos característicos de dicha zona y de los cuales pueden desprenderse una serie de aplicaciones biotecnológicas (Jácome Reina, 2017). Las aguas termales poseen un conjunto de microorganismos que varía según la procedencia, constitución y características fisicoquímicas que alberga el cuerpo termal (Ríos Vázquez, 2019), y a pesar de que hoy en día estas aguas son usadas para diversos fines curativos y de entretenimiento se sabe muy poco sobre la pluralidad y peculiaridad de los microorganismos que residen en ellas (Jácome Reina, 2017).

En el trabajo realizado por Ríos Vázquez (2019) se aislaron e identificaron bacterias de las aguas termales de Chignahuapan, Puebla. Dada la tolerancia que presentaron a la temperatura del lugar de muestreo se reconocieron como bacterias termófilas moderadas, e incluso unas cuentas presentaron halotolerancia y actividad amilolítica. Los géneros que lograron identificarse incluyen *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas mendocina*, *Pseudomonas pseudoalcaligen* y *Micrococcus*, siendo en su mayoría bacterias Gram negativas y las cuales podrían incluirse como cepas patógenas. Así mismo se destaca que la especie más abundante es la *P. aeruginosa*, la cual es considerada un patógeno que causa infecciones en

personas con un sistema inmune debilitado. Otras especies identificadas fueron *P. pseudoalcaligenes* y *M. luteus*, que pueden ser utilizadas en procesos de remediación biológica. En el estudio de De la Rosa Jorge & Mosso Romeo (2000) se menciona que en los cuerpos de agua termal se presentan de manera natural bacterias heterótrofas oligotróficas de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Enterobacter*, *Acinetobacter* y *Arthrobacter*, y que la cantidad de estos microorganismos puede variar, puesto que experimentan un periodo de inactividad o “estado durmiente” y por lo tanto no se multiplican, disminuyendo así el número de éstos. Asimismo, se encontró que predominan en mayor cantidad las bacterias heterótrofas oligotróficas, mientras que en menor cantidad se tiene aquellos microorganismos considerados autótrofos (quimilitotrofos y fototrofos) como son cianobacterias, bacterias verdes y rojas, siendo estas últimas aprovechables para la autodepuración de las aguas ya sea de manera natural o con la intervención biotecnológica. En la investigación realizada por Andueza et al., (2020) se reporta la calidad microbiológica de las aguas termales del balneario “El Tingo” ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador. La clasificación que determinaron para este lugar según su temperatura de 43.1°C corresponde a un agua del tipo hipertermal, en la cual los estudios microbiológicos reportaron la presencia de bacterias Gram positivas, Gram negativas y Hongos. En el caso de las bacterias Gram positivas se identificaron 8 especies, entre las cuales se encuentran *Aeromonas veronii*, *Aeromonas hydrophila*, *Aeromonas sobria*, *Burkholderia cepacia*, *Citrobacter freundii*, *Pseudomonas alcaligenes*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas fluorescens*, cuantificando un total de 14 cepas por todas las especies. Para las bacterias Gram negativas se tienen 3 especies conocidas como *Bacillus spp*, *Staphylococcus epidermidis*, y *Staphylococcus saprofiticus*, con un total de 5 cepas. Finalmente, en el caso de los hongos solo se reporta una especie *Aspergillus sp*. Ambos tipos de bacterias pueden emplearse como indicadores de la calidad de agua tanto superficial como subterránea. En la tabla 2 se presentan diferentes microorganismos termófilos aislados de diferentes zonas termales de diversas partes del mundo, señalando el lugar en donde fueron aislados y la aplicación que se ha reportado de cada microorganismo.

Tabla 2. Microorganismos termófilos aislados en diferentes aguas termales

Microorganismo aislado	País	Aplicación	Autor
<i>Bacillus sp.</i> <i>Bacillus licheniformis</i> <i>Thermomonas hydrothermalis</i>	Jordania	Producción de enzimas termoestables empleadas en procesos industriales y biotecnológicos.	Mohammad et al., 2017
<i>Bacillus licheniformis</i> <i>Bacillus aerius</i> <i>Bacillus sonorensis</i>	Morocco, Marruecos	Producción de enzimas de importancia industrial, principalmente amilasas y proteasas.	Aanniz et al., 2015)
<i>Bacillus sp</i> <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	India	Aplicaciones en la industria farmacéutica, del cuero, alimentaria y de procesamiento de desechos.	Kumar et al., 2013
<i>Thermomonas hydrothermalis</i> <i>Bacillus altitudinis</i>	Irán	Candidatos prometedores para aplicaciones industriales	Abdollahi, Ghane, & Babaeekhou, 2020
<i>Bacillus,</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Silanimonas lenta</i> <i>Thauera sp.</i> <i>Thermomonas haemolytica</i>	Turquía	Fuente de enzimas industriales	Oztas Gulmus & Gomez, 2020
<i>Brevibacterium linens</i> <i>Bacillus subtilis.</i>	Arabia	Aplicaciones biotecnológicas	El-Gayar, Al Abboud, & M. Essa, 2017
<i>Thermus sp.</i> <i>Bacillus sp.</i> <i>Pseudomonas sp</i>	Indonesia	Producción de amilasa para procesos industriales como las industrias alimentarias, de fermentación, textil, papelería, detergente y farmacéutica.	Ardhi, Sidauruk, Suraya, Pratiwi, & Pato, 2020
<i>Bacillus spp</i>	Egipto	Aplicaciones industriales	Taha et al., 2020
<i>Aeribacillus,</i> <i>Aneurinibacillus,</i> <i>Anoxybacillus,</i> <i>Bacillus,</i> <i>Brevibacillus,</i> <i>Geobacillus,</i> <i>Laceyella,</i> <i>Meiothermus,</i> <i>Saccharomonospora,</i> <i>Thermoactinomyces,</i> <i>Thermobifida</i> <i>Thermus</i>	Argelia	Fuente de termoenzimas para aplicaciones biotecnológicas	Benamar et al., 2020
<i>Bacillus y Geobacillus sp</i>	Malasia	Biocatalizadores de aplicación biotecnológica	Zuridah et al., 2011
<i>Anoxybacillus flavithermus,</i> <i>Geobacillus stearothermophilus</i> <i>Bacillus licheniformis,</i> <i>Thermus sp.</i>	Fiji	Tratamiento de agua contaminada por aceite. Material de esterilización para autoclaves.	Narayan, Hatha, Morgan, & Rao, 2008

Algas y Cianobacterias aisladas de ambientes extremos

Las algas son un grupo de plantas conocidas desde las civilizaciones antiguas. El término de algas fue introducido por primera vez por Linneo en 1753 y fue A. L. de Jussieu (1789) quien clasificó las plantas y delimitó las algas del resto del mundo vegetal. Las algas son organismos autótrofos, en su mayoría acuáticos y unos pocos son terrestres. El cuerpo de la planta puede estar estructurada como unicelular o multicelular sin vasculatura y con poca diferenciación en los tejidos, por lo que se les conoce como talofitos, es decir no tienen raíces, tallo y hojas. Puede existir desde una sola celda tan pequeña de 1 μ a algas grandes que pueden crecer hasta más de 60 m (Sahoo,2015). Las algas son organismos importantes por su capacidad para modificar el pH, la alcalinidad, el color, la turbidez y radioactividad del agua. Otra característica importante es la capacidad que tienen para generar grandes cantidades de materia orgánica y por esta razón son conocidas como los principales productores primarios en los ecosistemas acuáticos (Santamaria, 2010).

Las algas predominan en las fuentes termales, aunque algunas son sensibles al sulfuro, un componente utilizado como donador de electrones para la fotosíntesis anoxigénica. (Santamaria, 2010). También están presentes en diversos hábitats como en el agua (algas acuáticas), la tierra (algas terrestres), crecen como epífitas, endófitas y en condiciones extremas, en otras palabras, se puede decir que las algas son de ocurrencia universal (Sahoo,2015). De las 122,000 especies de algas que se conocen en el mundo, México registra 1,600 marinas y 1,102 dulceacuícolas, además de 2,530 que se clasifican como cianobacterias (González, 2018). La presencia de algas en una fuente termal es determinada principalmente por las condiciones fisicoquímicas del medio, por lo que se convierten en un referente del estado ecológico del mismo. Además, tienen un amplio potencial biotecnológico con gran utilidad. Las especies de algas más investigadas destacan *Chondrus crispus*, *Codium tomentosum*, *Undaria pinnatifida*, *Durvillaea antarctica*, *Ascophyllum nodosum*, *Polysiphonia lanosa*, *Asparagopsis armata* y *Ecklonia cava*. De las microalgas y cianobacterias, los géneros más estudiados son *Chlorella* y *Arthrospira*. (Mosqueira 2021).

Las cianobacterias son ecológicamente importantes debido a su papel en la producción de oxígeno y en la asimilación de carbono y nitrógeno. Aunque el desarrollo de la vida es difícil en las aguas termales, las cianobacterias son los organismos más adaptados a este medio. Las cianobacterias son los grupos microbianos más comúnmente reportados que constituyen los tapetes termofílicos y se consideran los principales productores primarios en este tipo de hábitats. Debido a sus capacidades, el estudio sobre la diversidad de cianobacterias en manantiales termales está cobrando importancia. Las diferentes investigaciones desarrolladas de las fuentes termales han permitido conocer los diferentes taxones de cianobacterias que se ha adaptado a estos medios. La diversidad de cianobacterias en los manantiales termales depende de dos factores básicos la temperatura del manantial termal y los químicos disueltos en el manantial termal (Öztürk, 2021).

En la tabla 3 se presentan algunas especies de cianobacterias aisladas de diferentes zonas termales.

Tabla 3. Especies de Cianobacterias aisladas de diferentes zonas termales.

Orden	País	Aplicación	Autor
<i>Oscillatoriales sp.</i>	Venezuela	Industria alimenticia	Fuenmayor, Gisela, Jonte, Lorena, Rosale & Morales, 2009
<i>Anagnostidinema amphibium</i> <i>Planktothrix clathrata</i>	Argentina	Industria farmacéutica	Flores, Rosa, Wenzel & Diaz, 2019
<i>Leptolyngbya sp.</i>	Hawái	Producción de bioactivos	Neupane, Luo, Yoshida, Sun y Williams, 2019
<i>Spirulina subsalsa</i> <i>Spirulina subtilissima</i> <i>Spirulina labyrinthiformis</i>	Perú	Producción de biodiesel	Ramos, 2020
<i>Nostoc sp.</i> <i>Calothrix sp.</i> <i>Hapalosiphon sp.</i>	Chile	Industria alimenticia	Ponce, 2014

Diatomeas aisladas de ambientes extremos

Las diatomeas son algas microscópicas unicelulares eucariotas. Se encuentra principalmente en hábitats acuáticos y se consideran parte importante del fitoplancton. Las diatomeas se han aislado de agua dulce, agua salobre y agua marina. Estas algas se desarrollan en temperaturas extremas, temperaturas muy altas o temperaturas muy bajas, y en diferentes condiciones de pH. Las diatomeas se caracterizan porque presentan una pared silificada y sus células se dividen en 2 mitades. (Wright et al.1989).

Las diatomeas utilizan el 20% del CO atmosférico y liberan por medio de la fotosíntesis oxígeno atmosférico vital para la vida. Sus cloroplastos tienen una composición única y diferente en comparación con los de otras algas verdes y plantas superiores ya que no contienen clorofila. A diferencia de otras microalgas, los orgánulos de las diatomeas y las gotas de lípidos están contenidos en una frústula silíceas en forma de caja. A diferencia de las microalgas de "cuerpo blando", las diatomeas no se dañan a menos que la presión aplicada para exprimir el aceite exceda su fuerza crítica. (Wright et al.1989).

La frústula de las diatomeas está compuesta de sílice pura, que le sirve como protección. Se compone de dos válvulas que están unidas por bandas que envuelven y mantienen la unidad. Las válvulas constan de cámaras hexagonales apiladas y divididas por placas de sílice. Esta estructura tan peculiar, es precisamente uno de los principales factores que motivan a la comunidad científica a realizar el aislamiento y cultivo de estos microorganismos. Se han realizado investigaciones con las diatomeas para su aplicación en la biotecnología y en remediación de suelo y agua. La mayoría de los trabajos se han desarrollado en Europa y Asia, donde se localizan diferentes zonas hidrotermales. En la tabla 4 se enlistan el número de géneros de diatomeas que se han aislado de aguas termales en diferentes países.

Tabla 4. Número de géneros de Diatomeas aisladas de diferentes zonas termales en diferentes partes del mundo.

Localidad	País	Año	Géneros	Aplicación	Autor
Alpes del Taueren orientales	Austria	2016	94	Síntesis de biomateriales	Weckström et al.2016
Burgas	España	2017	20	Remoción de metales en agua y tierra.	Leira et al.2017
Cuntis			7		
Panton			40		
Guítiriz			11		
Cerdeña	Italia	2018	136	Nanotecnología y ciencia material	Lai et al.2018
Austrias	España	2018	124	Biosensores ópticos	Cantonati et al.2018
Tanta	Egipto	2019	+ 100	No hay aplicación precisa	Abo et al.2019
Parque nacional Unzen-Amakusa	Japón	2020	87	Síntesis de combustibles	Suzuki et al.2020
Isla de San Miguel	Portugal	2021	4	No hay aplicación precisa	Delgado et al.2021

Respecto a las aplicaciones de las diatomeas se puede mencionar que han utilizado para el desarrollo de supercondensadores. Seckbach et al., (2019) fueron los primeros en proponer el concepto de estructura 3D de diatomita para el desarrollo de electrodos compuestos para su aplicación en condensadores electroquímicos, observándose que estas estructuras son interesantes para el almacenamiento de energía. Por otro lado, la contaminación con metales tóxicos tanto del suelo como del agua requiere cada vez más atención por parte de los científicos, en este sentido, se ha demostrado la presencia de diferentes géneros de algas de agua dulce, incluidas algas verdeazuladas, verdes filamentosas y diatomeas tolerantes a metales en sitios contaminados con metales (Jamali et al.2002). Asimismo, se han realizado investigaciones en las cuales se evidencia la sensibilidad de algunas microalgas para diferentes iones, por ejemplo, se ha encontrado que las microalgas presentes en biopelículas jóvenes son más sensibles a Zinc y Cadmio en comparación con las microalgas en biopelícula viejas (Bozarth et al.2009)

Discusión

Los microorganismos termófilos de los tapetes microbianos pueden adaptarse para sobrevivir en condiciones ambientales extremas, probablemente debido a sus modificaciones moleculares a nivel celular y subcelular, y tienen la capacidad de producir una amplia variedad de enzimas termoestables (Jonker, 2013). Es importante mencionar que a nivel mundial se ha explorado la riqueza microbiana en zonas geotérmicas, sin embargo, en México se tienen pocos estudios microbiológicos sobre estos ambientes, y se considera interesante explorarlos dado que se ha demostrado que las bacterias termófilas viven asociadas a diatomeas y cianobacterias filamentosas los cuales son organismos y microorganismos con gran potencial industrial y biotecnológico. Por otro lado, se ha demostrado que las diatomeas absorben el silicio circundante a baja concentración y es transportado a través de sus membranas, este mecanismo permite que sus biocápsulas de sílice (frústulas) sean utilizadas como nanomateriales (Rabiee, 2021). El contenido de SiO₂ varía en cada especie y con las condiciones ambientales. Las variables como el pH, la conductividad eléctrica, la dureza, la alcalinidad, la temperatura, los sólidos totales disueltos y la composición química intervienen en la relación y abundancia de las especies (White et al., 1964) ya que las diatomeas responden mejor a los cambios en el entorno físico-químico (Wright et al.1989). Se ha reportado que la conductividad eléctrica (CE) es un factor importante para determinar la composición de la comunidad de diatomeas epilíticas (Seckbach et al., 2019). Sin embargo, algunas especies permanecen a temperaturas elevadas y se desarrollan activamente e incluso llegan a formar masas, por lo que la temperatura se convierte en un factor importante. Las diatomeas (Bacillariophyceae) son con frecuencia un grupo de algas unicelulares omnipresente, de gran calidad y muy característico, con la presencia de paredes celulares silíceas, llamadas frústulas, asimismo, es el grupo más rico en especies de diatomeas, representando una gran importancia ecológica, biotecnológica y de producción primaria (Mosqueira 2021).

Conclusión

Las zonas geotérmicas son ricas en vida microscópica y la diversidad de estos microorganismos hace posible un gran número de aplicaciones industriales y biotecnológicas, desde los cosméticos hasta biorremediación. Si bien las aguas termales pueden tener algunas especies de microorganismos en común, sin embargo, cada fuente termal se caracteriza por sus propiedades fisicoquímicas, es por ello que el desarrollo de los microorganismos dependerá de factores como la temperatura, pH, contenidos de minerales entre muchos otros. México es un país que cuenta con diversas fuentes termales, sin embargo, no se conoce la riqueza microbiológica de las mismas, es importante enfatizar la importancia de conocer la riqueza de las fuentes termales para en un futuro aprovechar los recursos de cada uno de estas.

Bibliografía/Referencias

- Aanniz, T., Ouadghiri, M., Melloul, M., Swings, J., Ibjibijen, J., Ismaili, M., & Amar, M. (2015). scielo.br. Obtenido de scielo.br: <https://www.scielo.br/j/bjm/a/3rJVfGqbcWT5mCWg9R67TZx/?lang=en&format=html#>
- Abdollahi, P., Ghane, M., & Babaeekhou, L. (2020). tandfonline.com. Obtenido de tandfonline.com: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01490451.2020.1812774?scroll=top&needAccess=true>
- Abo-Shady, A. M., Zalat, A. A., Al-Ashkar, E. A., & Ghobara, M. M. (2018). Nanoporous Silica of Some Egyptian Diatom Frustules as a Promising Natural Material. *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*, 9(3), 414–425. <https://doi.org/10.2174/2210681208666180321113834>

- Adiguzel, A., H. Ozkan, O. Baris et al. 2009. Identification and characterization of thermophilic bacteria isolated from hot springs in Turkey. *J. Microbiol Methods* 79(3): 321–328. 24(9): 1697–1702.
- Alfaro, C., Aguirre, A., Bernal, N. F., & Gokcen, G. (2003). Inventario de fuentes termales del departamento de Cundinamarca. Ministerio de minas y energía.
- Andueza, F., Chaucala, S., Vinueza, R., Escobar, S., Medina Ramírez, G., & Araque, J. (2020). scielo.isciii.es. Obtenido de scielo.isciii.es: <https://scielo.isciii.es/pdf/ars/v61n1/2340-9894-ars-61-01-15.pdf>
- Ardhi, A., Sidauruk, A. N., Suraya, N., Pratiwi, N. W., & Pato, U. (2020). *Biodiversitas Revista de Diversidad Biológica*. Obtenido de *Biodiversitas Revista de Diversidad Biológica*: <https://www.smujo.id/biodiv/article/view/4956>
- Benamar, L., Bektas, K. I., Menasria, T., Belduz, A., Guler, H., Bedaida, I., Ayachi, A. (2020). Springer Link. Obtenido de Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42770-020-00376-0>
- Bhandari Neupane, J., Neupane, R. P., Luo, Y., Yoshida, W. Y., Sun, R., & Williams, P. G. (2019). Characterization of leptazolines A–D, polar oxazolines from the cyanobacterium *Leptolyngbya* sp., reveals a glitch with the “Willoughby–Hoye” scripts for calculating NMR chemical shifts. *Organic letters*, 21(20), 8449–8453.
- Bozarth, A., Maier, U. G., & Zauner, S. (2009). Diatoms in biotechnology: Modern tools and applications. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 82, Issue 2, pp. 195–201). <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1804-8>
- Cavello, I., Urbieto, M., Segretina, A., Giaveno, A., & Cavalito, S. (2017). tandfonline.com. Obtenido de tandfonline.com: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01490451.2017.1339144>
- De la Rosa Jorge, M. D., & Mosso Romeo, M. A. (2000). aguas.igme.es. Obtenido de aguas.igme.es: <https://aguas.igme.es/igme/publica/pdfart3/diversidad.pdf>
- Delgado, C., Gonçalves, V., Blanco, S., & Almeida, S. F. P. (2021). A new diatom (bacillariophyceae) species from a thermal spring in azores archipelago (são miguel island, atlantic ocean). *Botanical Sciences*, 99(1), 169–181. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2680>
- des Marais, D. J., & Walter, M. R. (2019). Terrestrial Hot Spring Systems: Introduction. *Astrobiology*, 19(12), 1419–1432. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1976>
- Drake, B. D., Campbell, K. A., Rowland, J. V., Guido, D. M., Browne, P. R., & Rae, A. (2014). Evolution of a dynamic paleo-hydrothermal system at Mangatete, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 282, 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.06.010>
- El-Gayar, K. E., Al Abboud, M. A., & M. Essa, A. M. (2017). microbiologyjournal.org. Obtenido de microbiologyjournal.org: https://microbiologyjournal.org/wp-content/uploads/2018/03/JPAM_Vol_11_No2_p_743-752.pdf
- Fernandez-Turiel, J., Garcia-Valles, M., Gimeno-Torrente, D., Saavedra-Alonso, J., & Martinez-Manent, S. (2005). The hot spring and geyser sinters of El Tatio, Northern Chile. *Sedimentary Geology*, 180(3–4), 125–147. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.07.005>
- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Sci* 1998; 281: 237-240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>
- Fouke, B. W., Bonheyo, G. T., Sanzenbacher, R., & Frias-Lopez, J. (2003). Partitioning of bacterial communities between travertine depositional facies at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA. *Can J Earth Sci*, 40(1531–1548). <https://doi.org/10.1139/e03-067>
- Fuenmayor, Gisela, Jonte, Lorena, Rosales-Loaiza, Néstor, & Morales, Ever. (2009). Crecimiento de la cianobacteria marina *Oscillatoria* sp. MOF-06 en relación al pH en cultivos discontinuos. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 29(1), 21-25.
- Ghilamicae, A. M., Budambula, N. L., Anami, S. E., Mehari, T., & Boga, H. I. (2018). *African Journal of Microbiology Research*. Obtenido de *African Journal of Microbiology Research*: <http://repository.embuni.ac.ke/bitstream/handle/123456789/1666/Ghilamicae%20Budambula%20%20et%20al%20June%20%202018.pdf?sequence=1>
- González-Guzmán, R., Inguaggiato, C., Peiffer, L., Weber, B., & Kretzschmar, T. (2019). Fault-controlled geothermal fluids of the northern Trans-Mexican Volcanic Belt: A geochemical and isotopic study of

- the Los Geysers field (Valley of Queretaro, Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 388, 106681. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106681>
- Gunashova, G., Ahmadova, F., & Khalilov, R. (2021). *jlsbjournal.org*. Obtenido de *jlsbjournal.org*: <https://jlsbjournal.org/online-access/66-thermophilic-bacteria-of-the-hot-springs-ashagi-istisu-and-yukhari-istisu-of-the-kalbajar-region-of-the-republic-of-azerbaijan-gy-gunashova-fr-ahmadova-ri-khalilov.html>
- H. Taha, G., El-Shatoury, E. H., Tolba, S. T., & Ibrahim, M. K. (2020). *journals.ekb.eg*. Obtenido de *journals.ekb.eg*: https://journals.ekb.eg/article_133692.html
- Jabeen, F., Muneer, B., & Qazi, J. I. (2019). *Revista de zoología de Pakistán*. Obtenido de *Revista de zoología de Pakistán*: <http://researcherslinks.com/current-issues/Characterization-of-Thermophilic-Bacteria-Anoxybacillus/20/1/2199/html>
- Jácome Reina, A. J. (2017). *dspace.uce.edu.ec*. Obtenido de *dspace.uce.edu.ec*: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13212/1/T-UCE-0012-42.pdf>
- Jamali, A. A., Akbari, F., Ghoraklu, M. M., de la Guardia, M., & Khosroushahi, A. Y. (2012). Applications of diatoms as potential microalgae in nanobiotechnology. *BiolImpacts*, 2(2), 83–89. <https://doi.org/10.5681/bi.2012.012>
- Jorge González. (2018). Algas de México, fundamentales para el planeta, la industria, la medicina y la alimentación. , de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Sitio web: <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/algas-de-mexico-fundamentales-para-el-planeta-la-industria-la-medicina-y-la-alimentacion?idiom=es>
- Jonker, C. Z., Van Ginkel, C., & Olivier, J. (2013). Association between physical and geochemical characteristics of thermal springs and algal diversity in Limpopo Province, South Africa. *Water SA*, 39(1), 95-104.
- Kim HK, Cho IH, Hwang EA, Kim YJ, Kim BH. Benthic Diatom Communities in Korean Estuaries: Species Appearances in Relation to Environmental Variables. *Int. J Environ Res Pub Heal* 2019; 16(15): 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152681>
- Knight MJ, Senior L, Nancolas B, Ratcliffe S, Curnow P. Direct evidence of the molecular basis for biological silicon transport. *Nat Commun* 2016; 7: 1-11. <https://doi.org/10.1038/ncomms11926>
- Kumar Panda, M., Kumar Sahu, M., & Tayung, K. (2013). *National Library of Medicine*. Obtenido de *National Library of Medicine*: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3696853/>
- Kuppusamy, P., Soundharrajan, I., Srigopalram, S., Yusoff, M. M., Pragas Maniam, G., Govindan, N., & Choi, K. C. (2017). Potential pharmaceutical and biomedical applications of Diatoms microalgae-An overview. In *Indian Journal of Geo Marine Sciences* (Vol. 46, Issue 04).
- Lai, G. G., Padedda, B. M., Wetzel, C. E., Cantonati, M., Sechi, N., Lugliè, A., & Ector, L. (2019). Diatom assemblages from different substrates of the Casteldoria thermo-mineral spring (Northern Sardinia, Italy).
- Lampe, R. H., Hernandez, G., Lin, Y. Y., & Marchetti, A. (2021). Representative Diatom and Coccolithophore Species Exhibit Divergent Responses throughout Simulated Upwelling Cycles. *MSystems*, 6(2). <https://doi.org/10.1128/msystems.00188-21>
- Leira, M., Mejjide-Failde, R., & Torres, E. (2017). Diatom communities in thermo-mineral springs of Galicia (NW Spain). In *Diatom Research* (Vol. 32, Issue 1).
- Leland HV, Porter SD. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Fresh Biol* 2000; 44: 279-301. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2000.00536.x>
- Martin-Jézéquel V, Calu G, Candela L, Amzil Z, Jauffrais T, Séchet V, Weigel P. Effects of organic and inorganic nitrogen on the growth and production of domoic acid by *Pseudo-nitzschia multiseries* and *P. australis* (Bacillariophyceae) in *Cultur Marin Drugs* 2015; 13: 7067-7086. <https://doi.org/10.3390/md13127055>
- Miller, D. N., Jr. (1978). THERMAL SPRINGS OF WYOMING. In *THE GEOLOGICAL SURVEY OF WYOMING* (pp. 3–6). <https://www.osti.gov/servlets/purl/5804772>
- Mosqueira, M. L. M., Soto, J. L. L., & Pérez, C. P. G. (2021). Aguas termales, arcillas y algas como ingredientes en la cosmética termal. *Investigación: cultura, ciencia y tecnología*, (26), 55-64.

- M.P., K., E., K., & J., P. (2019). University of Namibia. Obtenido de University of Namibia: <https://repository.unam.edu.na/handle/11070/2623>
- Nabagye, A., & Yatuha, J. (2022). Revista de investigación científica académica estadounidense para ingeniería, tecnología y ciencias. Obtenido de Revista de investigación científica académica estadounidense para ingeniería, tecnología y ciencias: https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/7429
- Narayan, V. V., Hatha, M. A., Morgan, H. W., & Rao, D. (2008). jstage.jst.go.jp. Obtenido de jstage.jst.go.jp: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme2/advpub/0/advpub_ME08105/_article/-char/ja/
- Oztas Gulmus, E., & Gormez, A. (2020). Springer Link. Obtenido de Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00284-020-01880-0>
- Öztürk, S. . (2021). Cyanobacterial Diversity and Physicochemical Characteristics of Thermal Springs in The Kütahya Province of Turkey. *Bangladesh Journal of Plant Taxonomy*, 28(2), 413–428. <https://doi.org/10.3329/bjpt.v28i2.57137>
- Panda, M.K., M.K. Sahu & K. Tayung. 2013. Isolation and characterization of a thermophilic *Bacillus* sp. with protease activity isolated from hot spring of Tarabalo, Odisha, India. *Iran J. Microbiol.* 5(2): 159–165.
- Panosian, H., Margaryan, A., & Birkeland, N.-K. (11 de Mayo de 2020). Springer Link. Obtenido de Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00792-020-01173-1>
- PARENTEAU, M. N., & CADY, S. L. (2010). MICROBIAL BIOSIGNATURES IN IRON-MINERALIZED PHOTOTROPHIC MATS AT CHOCOLATE POTS HOT SPRINGS, YELLOWSTONE NATIONAL PARK, UNITED STATES. *PALAIOS*, 25(2), 97–111. <https://doi.org/10.2110/palo.2008.p08-133r>
- Ponce, Ernesto. (2014). Nostoc: un alimento diferente y su presencia en la precordillera de Arica. *Idesia (Arica)*, 32(2), 119-121.
- Potapova M, Charles DF. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. *Ecol Ind* 2007; 7: 48-70. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.10.001>
- Pumas C, Pruetiworanan S, Peerapornpisal Y. Diatom diversity in some hot springs of northern Thailand *Bot* 2018; 24(1): 69-86. <https://doi.org/10.2478/botlit-2018-0007>
- Rabiee, N., Khatami, M., Jamalipour Soufi, G., Fatahi, Y., Iravani, S., & Varma, R. S. (2021). Diatoms with invaluable applications in nanotechnology, biotechnology, and biomedicine: Recent advances. In *ACS Biomaterials Science and Engineering* (Vol. 7, Issue 7, pp. 3053–3068). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsbio.1c00475>
- Rale, M. J., Kadzik, R. S., & Petry, S. (2018). Phase Transitioning the Centrosome into a Microtubule Nucleator. In *Biochemistry* (Vol. 57, Issue 1, pp. 30–37). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.7b01064>
- Ramachandra, T. v., Mahapatra, D. M., Karthick, B., & Gordon, R. (2009). Milking diatoms for sustainable energy: Biochemical engineering versus gasoline-secreting diatom solar panels. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(19), 8769–8788. <https://doi.org/10.1021/ie900044j>
- Ramos Cruzate, L. A. (2020). Análisis de experiencias de mejora continua en la producción industrial de Spirulina. Una revisión sistemática.
- Ríos Vázquez, D. I. (2019). repositorioinstitucional.buap.mx. Obtenido de repositorioinstitucional.buap.mx: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/4485>
- Sahoo, Dinabandhu. Seckbach, Joseph. (2015). *The algae world*. New York, EUA: Springer.
- Santamaría, D. E. (2010). Algas termófilas : revisión y caso de estudio parque nacional natural los nevados. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/8744>
- Schinteie, R., Campbell, K. A., & Browne, P. R. (2007). Microfacies of stromatolitic sinter from acid-sulphate-chloride springs at Parakiri Stream, Rotokawa geothermal field, New Zealand. *Palaeontologia Electronica*. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.693.2846&rep=rep1&type=pdf>
- Stoyneva, M. P. (2003). Survey on green algae of Bulgarian thermal springs. *BIOLOGIA-BRATISLAVA-*, 58(4), 563-574.

- Subir, K. (2005). CLASSIFICATION OF GEOTHERMAL SYSTEMS – A POSSIBLE SCHEME. PROCEEDINGS, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2005/sanyal1.pdf>
- Suzuki, A. C., Kagoshima, H., Chilton, G., Grothman, G. T., Johansson, C., & Tsujimoto, M. (2017). Meiofaunal richness in highly acidic hot springs in Unzen-Amakusa National Park, Japan, including the first rediscovery attempt for mesotardigrada. *Zoological Science*, 34(1), 11–17. <https://doi.org/10.2108/zs160108>
- T. Mohammad, B., I. Al Daghistani, H., Jaouani, A., Abdel-Latif, S., & Kennes, C. (2017). *hindawi.com*. Obtenido de *hindawi.com*: <https://www.hindawi.com/journals/ijmicro/2017/6943952/>
- Weckström, K., Weckström, J., Huber, K., Kamenik, C., Schmidt, R., Salvenmoser, W., Rieradevall, M., Weisse, T., Psenner, R., & Kurmayer, R. (2016). Impacts of Climate Warming on Alpine Lake Biota over the Past Decade. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(2), 361–376. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-058>
- White, D. E., Thompson, G. A., & Sandberg, C. H. (1964). Rocks, Structure, and Geologic History of Steamboat Springs Thermal Area, Washoe County, Nevada, U.S. Geological Survey Professional Paper. <https://pubs.usgs.gov/pp/0458b/report.pdf>
- Ximena Flores, Rosa², I. Nadia de la, Wenzel³, María T., & Diaz², Mónica M.. (2019). CIANOBACTERIAS ÁCIDO-TERMÓFILAS DEL COMPLEJO TERMAL COPAHUE, NEUQUÉN, ARGENTINA. *Darwiniana, nueva serie*, 7(1), 39-56. <https://dx.doi.org/10.14522/darwiniana.2019.71.834>
- Yadav, P., Korpole, S., Prasad, G. S., Sahni, G., Maharjan, J., & Sreerama, L. (2018). *jabonline.in*. Obtenido de *jabonline.in*: https://jabonline.in/admin/php/uploads/268_pdf.pdf
- Zuridah, H., Norazwin, N., Aisyah, S. S., Fakhruzzaman, M., & Zeenathul, N. A. (2011). *academicjournals.org*. Obtenido de *academicjournals.org*: <https://academicjournals.org/journal/AJMR/article-full-text-pdf/158EDA213331.pdf>