

Zeolita clinoptilolita: la piedra que pone a prueba a las bacterias

Clinoptilolite Zeolite: The Stone That Puts Bacteria to the Test

César David Bárcenas Rivera, Samuel Salazar García, Eunice Lares Villaseñor, Juana Tovar Oviedo y Juan Manuel Vargas Morales

Resumen

La resistencia a los antimicrobianos avanza mientras los tratamientos pierden eficacia. Su origen no está sólo en la biología de los microorganismos, sino también en la forma en que utilizamos estos fármacos en la medicina y la producción animal. En este contexto, la zeolita clinoptilolita (ZC), un mineral abundante en México, emerge como una alternativa en estudio. Este trabajo explora su actividad antimicrobiana *in vitro* frente a bacterias de relevancia clínica. Los resultados muestran un efecto selectivo: la ZC reduce el crecimiento de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, pero no de *Salmonella* spp. Estos hallazgos abren nuevas líneas de investigación sobre el uso de materiales naturales como apoyo en el control de infecciones resistentes, al tiempo que sitúan a México en un punto estratégico para el desarrollo de soluciones basadas en sus propios recursos.

Palabras clave: resistencia antimicrobiana, zeolita clinoptilolita, bacterias resistentes, *Escherichia coli*, antimicrobianos.

CÓMO CITAR ESTE TRABAJO

Bárcenas Rivera, C. D., Salazar García, S., Lares Villaseñor, E., Tovar Oviedo, J., y Vargas Morales, J. M. (2026, mayo-julio). Zeolita clinoptilolita: la piedra que pone a prueba a las bacterias. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 27(2). <http://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2026.27.2.5>

Abstract

Antimicrobial resistance is advancing as treatments lose effectiveness. Its origin lies not only in the biology of microorganisms, but also in how these drugs are used in medicine and animal production. In this context, clinoptilolite zeolite (CZ), a mineral abundant in Mexico, emerges as an alternative under study. This work explores its *in vitro* antimicrobial activity against clinically relevant bacteria. The results show a selective effect: CZ reduces the growth of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, but not *Salmonella* spp. These findings open new avenues of research on the use of natural materials as support in the control of resistant infections, while positioning Mexico as a strategic contributor to the development of solutions based on its own resources.

Keywords: antimicrobial resistance, clinoptilolite zeolite, resistant bacteria, *Escherichia coli*, antimicrobials.

César David Bárcenas Rivera

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Químico farmacobiólogo con estudios de posgrado en salud pública por la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México. Su trabajo se ha enfocado en el estudio de enfermedades infecciosas, con experiencia en investigación básica y aplicada en microbiología, virología y epidemiología. Ha participado en proyectos de vigilancia epidemiológica y salud pública orientados al análisis de agentes infecciosos y su efecto en la población, así como al diseño de estrategias para la prevención y el control de enfermedades. Sus áreas de interés incluyen la vigilancia epidemiológica, la salud pública y el estudio de enfermedades infecciosas.

 a297355@alumnos.uaslp.mx

 <https://orcid.org/0009-0006-8227-759X>

Samuel Salazar García

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Profesor e investigador de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México; miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII), nivel I; y jefe del Laboratorio de Química General y Síntesis Orgánica desde 2022. Forma parte del Posgrado en Ciencias Fármaco-Biológicas de la UASLP, donde participa en la formación de estudiantes de licenciatura y posgrado. Su trabajo científico se centra en la evaluación de suplementos para el control y tratamiento de enfermedades crónicas no transmisibles e infecciosas, mediante el análisis de parámetros bioquímicos, hematológicos y microbiológicos en modelos experimentales y población humana. Cuenta con más de diez artículos publicados en revistas indexadas, derivados de colaboraciones interinstitucionales.

 samuel.salazar@uaslp.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-8083-347X>

Juan Manuel Vargas Morales

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Profesor-investigador de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México. Está adscrito a la Licenciatura en Químico Farmacobiólogo, al Posgrado en Ciencias Farmacobiológicas, a la Maestría en Análisis Clínicos y al Laboratorio de Análisis Clínicos con Servicio al Público “Dr. Pedro Medina de los Santos”; además, participa como académico en la Maestría en Análisis Clínicos de la Universidad del Noreste, en Tampico, Tamaulipas. Sus líneas de investigación se centran en la bioquímica y genómica de enfermedades complejas comunes, así como en el aseguramiento de la calidad en el laboratorio clínico. Es investigador nacional nivel II del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII) y cuenta con perfil deseable para profesores-investigadores de tiempo completo otorgado por la Secretaría de Educación Pública; es químico clínico certificado por el Consejo Nacional de Químicos Clínicos (CONAQUIC) y el Centro Nacional de Evaluación para la Educación Superior (CENEVAL).

 juan.vargas@uaslp.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-5959-7815>

 www.researchgate.net/Juan-Vargas-Morales

Eunice Lares Villaseñor

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Química farmacobióloga con maestría y doctorado en ciencias farmacobiológicas por la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México. Es candidata al Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNI). Se desempeña como profesora de asignatura en el área básica y clínica, e investigadora asociada en la misma facultad. Realizó una estancia de investigación en el Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán. Cuenta con cuatro publicaciones en revistas internacionales arbitradas y dos artículos de divulgación científica; ha dirigido proyectos de investigación a nivel licenciatura y ha asesorado y codirigido dos tesis de maestría. Sus líneas de investigación se enfocan en el análisis de determinantes de la salud en enfermedades crónicas no transmisibles y en el desarrollo de puntajes de riesgo genético.

 eunice.lares@uaslp.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-9765-3339>

Juana Tovar Oviedo

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Profesora investigadora de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México. Es química farmacobióloga, con maestría en educación con especialidad en innovación educativa. Cuenta con más de 42 años de trayectoria docente en el programa de Químico Farmacobiólogo; ha sido responsable del laboratorio de microbiología por más de 25 años. Ha participado en la gestión académica como integrante del consejo técnico consultivo de la facultad, consejera técnica de profesores y miembro de instancias de higiene, seguridad y protección civil. Es presidenta de la Academia de Infectología y secretaria de la Academia de Diagnóstico Clínico. Ha presentado más de 100 trabajos en eventos científicos nacionales y fue delegada estatal de la Olimpiada de Biología de la Academia Mexicana de Ciencias durante más de 18 años.

 jtoviedo@uaslp.mx

 <https://orcid.org/0009-0003-0300-7064>

Un enemigo que aprende

La resistencia a los antimicrobianos se ha convertido en una de las mayores preocupaciones de la salud pública a nivel mundial. No es un problema lejano ni exclusivo de ciertos países: afecta por igual a personas de distintas edades, contextos sociales y regiones del planeta (OMS, 2021). En pocas palabras, se trata de una amenaza que nos concierne a todos.

Para dimensionar el problema, conviene empezar por lo básico. Los antimicrobianos, entre ellos los antibióticos, son medicamentos diseñados para prevenir y tratar infecciones causadas por microorganismos. Se utilizan no sólo en humanos, sino también en animales y plantas, lo que los convierte en una herramienta indispensable para la salud y la producción de alimentos.

Sin embargo, los microorganismos no permanecen pasivos frente a estos fármacos. La resistencia antimicrobiana no surge porque “quieran” provocar enfermedades más graves, sino como parte de un proceso natural de supervivencia. Al igual que cualquier ser vivo, bacterias y otros microorganismos desarrollan estrategias para adaptarse a su entorno y evadir amenazas —entre ellas, los antibióticos— (Karaman et al., 2020).

Cuando la adaptación se vuelve riesgo

Entonces, si la resistencia es un fenómeno natural, ¿por qué debería preocuparnos? El problema aparece cuando estos mecanismos comienzan a interferir con nuestra capacidad para tratar infecciones comunes. En la naturaleza, la resistencia permite a los microorganismos competir y sobrevivir; en el contexto de la medicina moderna, en cambio, se transforma en una amenaza seria: infecciones que antes eran fáciles de curar pueden volverse persistentes, provocar complicaciones graves e incluso poner en riesgo la vida de los pacientes (Holmes et al., 2016).

Las consecuencias van más allá del ámbito individual. A medida que los microorganismos resistentes se propagan, los tratamientos se vuelven más largos, costosos y menos eficaces. Esto implica estancias hospitalarias prolongadas, mayor uso de recursos sanitarios y un aumento significativo en los costos de la atención médica, con un efecto directo en los sistemas de salud.

Este escenario no es nuevo. Desde los primeros años del uso de los antibióticos, especialistas en microbiología e infectología advirtieron sobre este riesgo. Incluso Alexander Fleming, descubridor de la penicilina, alertó en 1945 que su hallazgo podría perder eficacia si se utilizaba de manera indiscriminada (Fleming, 1945).

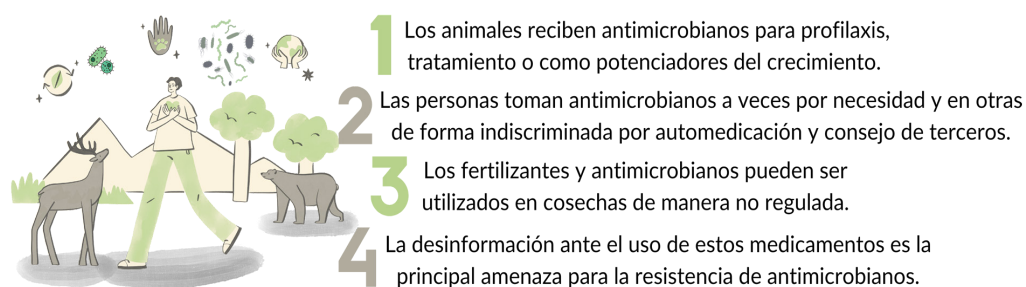


De los “milagros” al desgaste

¿Cómo pasamos entonces de considerar a los antimicrobianos como auténticos “medicamentos milagro” a enfrentar una era en la que la resistencia es cada vez más común y el desarrollo de nuevos antibióticos avanza con lentitud? No existe una única respuesta. Se trata de un problema complejo, en el que confluyen múltiples factores. No obstante, uno aparece de manera constante: el uso excesivo e inadecuado de estos medicamentos en distintos ámbitos, como la medicina humana, la ganadería y la agricultura, señalado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como uno de los principales retos a enfrentar (OMS, 2015). Estas y otras causas que contribuyen al desarrollo de la resistencia a los antimicrobianos se resumen en la figura 1.

Figura 1. Representación de las principales causas de la resistencia a antimicrobianos.

Créditos: elaboración propia basada en datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2019).



Entre la receta y el corral

Para comprender mejor la problemática de la resistencia a los antimicrobianos, conviene observar cómo se utilizan estos medicamentos en distintos ámbitos de la vida cotidiana. Su empleo no se limita a los hospitales: también está presente en el hogar, en la atención veterinaria y en los sistemas de producción de alimentos.

En las personas, los antimicrobianos se prescriben de forma individual para tratar infecciones ya establecidas. En algunos casos, también se utilizan de manera preventiva —por ejemplo, en pacientes que han sido sometidos recientemente a una cirugía—, con el objetivo de evitar posibles infecciones posteriores (McEwen y Fedorka-Cray, 2002). En estos escenarios, la dosis y la duración del tratamiento suelen ajustarse a las características específicas de cada paciente.

El panorama es muy distinto cuando se trata del uso de antimicrobianos en animales. Aquí pueden identificarse dos grandes contextos: el de los animales de compañía, cuyo tratamiento es comparable al de los humanos, y el de los animales de crianza destinados al consumo. En este último caso, el uso de antimicrobianos rara vez es individualizado. Por razones prácticas y económicas, los medicamentos suelen administrarse de manera colectiva, incorporándolos al alimento o al agua que consume todo el grupo, incluso cuando sólo algunos animales presentan signos de enfermedad (Van Boeckel et al., 2015).

Este tipo de prácticas —en las que el tratamiento se aplica de forma generalizada y con un control limitado— contribuye de manera importante al desarrollo y la propagación de la resistencia a los antimicrobianos. Aunque su uso se justifica por la necesidad de mantener la productividad y reducir pérdidas económicas, con frecuencia se subestiman sus consecuencias a largo plazo para la salud pública.

Un aspecto que agrava aún más esta situación es que muchos de los antimicrobianos empleados en la ganadería son los mismos que se utilizan para tratar infecciones en humanos. En realidad, son pocos los fármacos diseñados exclusivamente para uso humano. Por el contrario, algunos antimicrobianos desarrollados para la producción animal no se emplean en personas debido a su elevada toxicidad. Esta estrecha relación entre ambos ámbitos favorece la aparición de microorganismos resistentes que pueden circular entre animales, humanos y el ambiente.

Una piedra porosa bajo la lupa

La necesidad de desarrollar nuevas estrategias para enfrentar la resistencia a los antimicrobianos no es sólo una preocupación científica, sino también un compromiso global. Esta urgencia se refleja en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), de los cuales al menos siete se relacionan de manera directa con esta problemática, al enfatizar la protección de la salud, el bienestar y el uso responsable de los recursos naturales (ONU, 2019).

Entre estos objetivos destaca el Objetivo 3, enfocado en garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades. Una de sus metas centrales es impulsar la investigación y el desarrollo de nuevas alternativas para combatir enfermedades transmisibles, particularmente en regiones con mayores limitaciones de acceso a tratamientos. Este enfoque reconoce que las soluciones deben ser eficaces, accesibles y, al mismo tiempo, compatibles con la protección del medio ambiente, en concordancia con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud.

En este escenario, la zeolita clinoptilolita (ZC) ha comenzado a llamar la atención de la comunidad científica como una posible herramienta para el estudio de diversas enfermedades, tanto infecciosas como no infecciosas (Panaiotov et al., 2024; Yao et al., 2019). Su interés radica no sólo en sus posibles beneficios terapéuticos, sino también en su origen natural y en sus propiedades fisicoquímicas particulares.

Arquitectura de un mineral activo

Las zeolitas son minerales de origen volcánico presentes de forma natural en la corteza terrestre. Se conocen más de 80 tipos distintos, siendo la clinoptilolita una de las más abundantes y estudiadas (Mastinu et al., 2019). El término “zeolita” proviene del griego y significa literalmente “piedra que hierve”, una referencia al comportamiento que presenta al calentarse. Desde el punto de vista químico, estas sustancias pertenecen al grupo de los aluminosilicatos, ya que están formadas principalmente por átomos de aluminio y silicio organizados en una estructura altamente ordenada (Jha y Singh, 2016).

Una de las características más destacadas de la ZC es su estructura porosa, compuesta por cavidades microscópicas de tamaño similar al de muchas moléculas. Esta propiedad le confiere una elevada capacidad de adsorción, es decir, la habilidad de retener diversas sustancias en su superficie o en el interior de sus poros. Gracias a ello, las zeolitas han sido ampliamente utilizadas en áreas como la agronomía, la ecología y diversos procesos industriales.

En años recientes, estas propiedades han motivado su estudio en el ámbito de la medicina veterinaria y humana. Diversas investigaciones han reportado efectos favorables de la ZC en distintas aplicaciones médicas (figura 2). No obstante, es importante subrayar que, en el caso del uso en humanos, su aplicación segura se propone al consumo por vía oral, bajo condiciones adecuadas y con un control riguroso de su calidad y pureza.

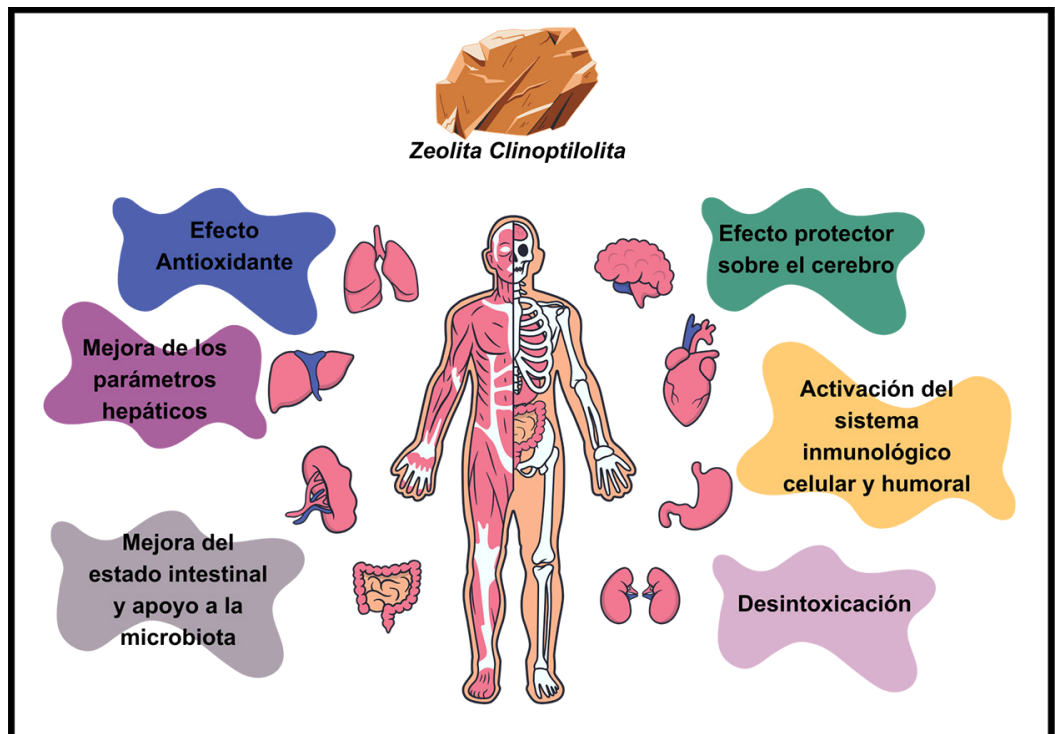


Figura 2. Representación esquemática de los principales efectos fisiológicos de la ZC en el organismo humano.

Créditos: elaboración propia basada en datos de Kraljević Pavelić et al. (2018).

Entre las aplicaciones más prometedoras de la ZC se encuentra su capacidad para limitar la proliferación de bacterias patógenas. Estudios recientes han demostrado que la ZC, particularmente en su forma micronizada, puede ejercer efectos antimicrobianos contra *Escherichia coli* cuando se emplea en concentraciones específicas (Cerbu et al., 2020). *Escherichia coli* es una bacteria que habita de manera natural en el intestino de humanos y animales; sin embargo, algunas de sus cepas pueden provocar infecciones gastrointestinales severas, diarrea, infecciones urinarias e incluso cuadros más graves, especialmente en niños, adultos mayores y personas con sistemas inmunológicos comprometidos.

Este hallazgo abre la puerta a su posible utilización como apoyo en la prevención y el tratamiento de infecciones causadas por microorganismos de alta relevancia clínica, como la ya mencionada *Escherichia coli*, y probablemente de otros patógenos de importancia sanitaria, entre ellos *Staphylococcus aureus* y *Salmonella typhi*. *Staphylococcus aureus* es una bacteria frecuentemente asociada con infecciones de la piel, tejidos blandos y heridas quirúrgicas, y algunas de sus cepas —como las resistentes a la meticilina— representan un desafío importante en el entorno hospitalario. Por su parte, *Salmonella typhi* es el agente causante de la fiebre tifoidea, una enfermedad infecciosa que sigue siendo un problema de salud pública en diversas regiones del mundo, especialmente en contextos con acceso limitado a agua potable y saneamiento adecuado.

Estas bacterias son responsables de un número considerable de infecciones tanto en la comunidad como en el ámbito hospitalario y, en los últimos años, han mostrado una preocupante capacidad para desarrollar resistencia a múltiples antibióticos, lo que dificulta su tratamiento y aumenta el riesgo de complicaciones graves (Raofi et al., 2023; Saha et al., 2020; Shariati et al., 2020).

Promesa y cautela

No obstante, el interés creciente en el uso de la ZC en aplicaciones humanas también ha despertado dudas legítimas en el público, especialmente en lo relacionado con su seguridad. Como ocurre con cualquier sustancia con potencial terapéutico, es indispensable evaluar de manera rigurosa sus efectos, las dosis adecuadas y los posibles riesgos antes de recomendar su empleo de forma generalizada.

A pesar de su potencial, el uso de la ZC aún se encuentra en una etapa temprana de investigación. En México, su aplicación es limitada y se concentra principalmente en la cría de animales, donde se emplea como aditivo en la alimentación o en el manejo ambiental. Hasta el momento, no se han desarrollado campañas nacionales amplias que promuevan su uso en otros campos, como la salud humana o la prevención de enfermedades, lo que subraya la necesidad de continuar investigando sus propiedades y posibles beneficios.

Un país con vetas y preguntas

México juega un papel relevante en la investigación y el desarrollo del uso de zeolitas, ya que cuenta con yacimientos significativos de tres de las cinco zeolitas naturales más abundantes del mundo (figura 3), incluida la zeolita clinoptilolita (ZC), que ha demostrado ser la más adecuada para posibles aplicaciones médicas (Novo y Costafreda, 2018). En el país, los yacimientos de clinoptilolita se distribuyen ampliamente en el noroeste y occidente, particularmente en estados como Sonora, Chihuahua y Nayarit, así como en diversas regiones del centro y sur. La natrolita se localiza principalmente en la península de Baja California, mientras que la escolecita y la mesolita se concentran en zonas específicas del centro-norte, como Zacatecas, y del sur, como Oaxaca, respectivamente. Esta abundancia abre una oportunidad singular para que el país contribuya a los estudios sobre el potencial de las zeolitas en la lucha contra la resistencia antimicrobiana.

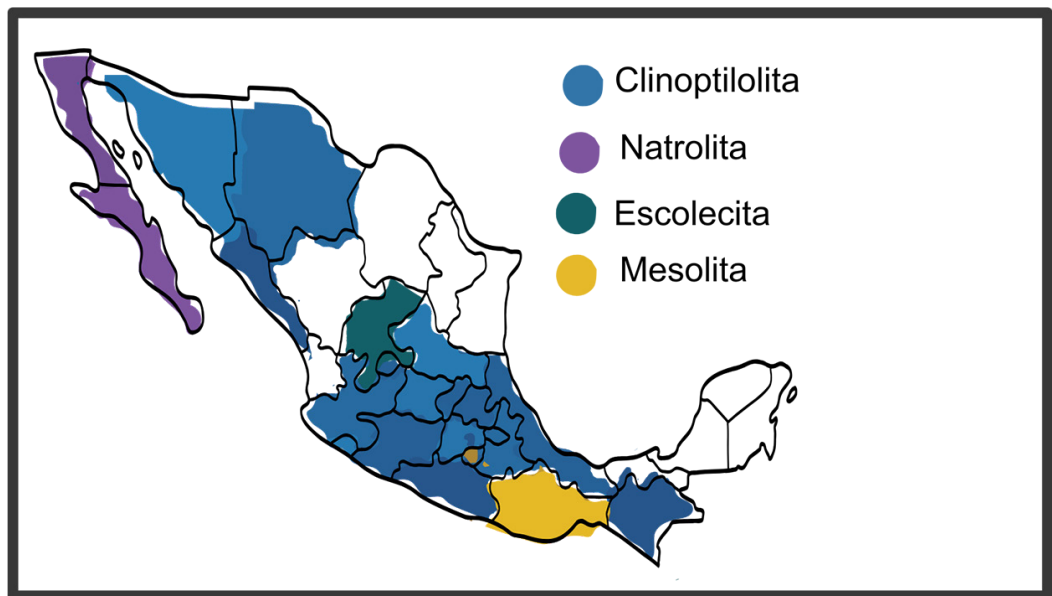


Figura 3. Distribución geográfica de las zeolitas predominantes en México.

Créditos: elaboración propia basada en datos de Novo y Costafreda (2018).

Valorar y aprovechar las zeolitas presentes en México representa una oportunidad estratégica tanto para la ciencia como para la salud pública. Impulsar su estudio en investigaciones científicas no sólo contribuiría a ampliar el conocimiento global sobre estos materiales naturales, sino que también podría posicionar al país como referente en el desarrollo de nuevas estrategias para la prevención y el tratamiento de infecciones resistentes a los antibióticos.

En la actualidad, las zeolitas se utilizan en México en una amplia variedad de aplicaciones industriales y productivas: desde la formulación de alimentos balanceados y la retención de metales pesados en aguas residuales industriales,

hasta procesos propios de la curtiduría y la galvanoplastia. Además, desempeñan un papel importante como catalizadores en procesos químicos y se emplean en sectores como la acuicultura, la agricultura y el refinado del petróleo (Novo y Costafreda, 2018).

A pesar de esta diversidad de usos, el potencial de las zeolitas mexicanas está lejos de aprovecharse por completo. Sus métodos de extracción continúan siendo, en muchos casos, tradicionales y poco integrados a los avances de la minería moderna y la investigación científica. Esta situación limita el desarrollo de aplicaciones de mayor valor agregado, especialmente en áreas emergentes como la salud humana, donde la innovación y el control de calidad resultan determinantes.

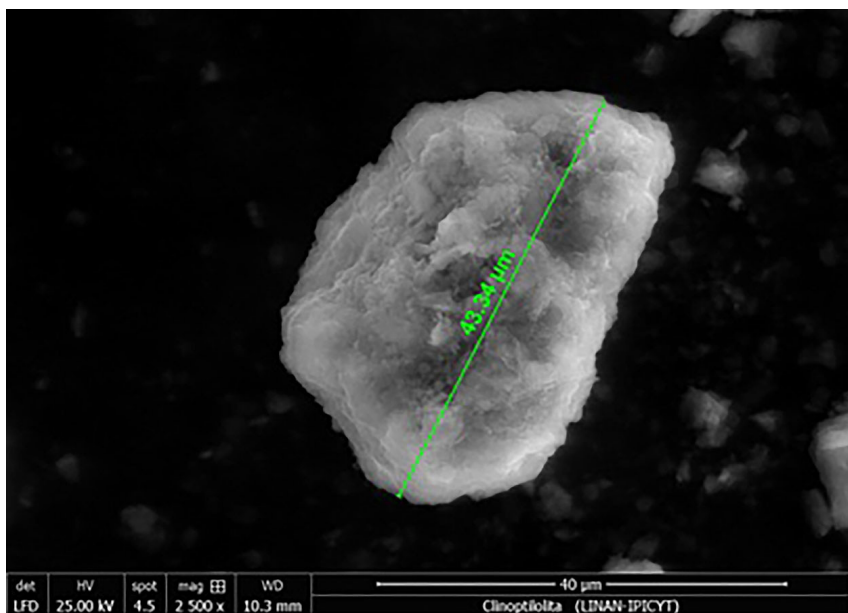


Figura 4. Microfotografía de la composición física de la muestra comercial de ZC por SEM.

Créditos: Laboratorios de Análisis Clínicos y el Laboratorio de Inmunología y Biología Celular y Molecular, Facultad de Ciencias Químicas, UASLP

Del mineral al laboratorio

Con el objetivo de explorar el potencial de las zeolitas mexicanas frente a la resistencia a los antimicrobianos, nuestro grupo de investigación —de los laboratorios de Análisis Clínicos y de Inmunología y Biología Celular y Molecular de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí— emprendió el estudio de una muestra comercial de ZC proveniente de la Mina San Francisco, ubicada en el municipio de San Francisco, Guanajuato. Este enfoque parte de una premisa clara: los recursos naturales del país pueden convertirse en aliados para enfrentar problemas globales de salud.

Antes de evaluar su efecto biológico, el mineral fue sometido a un proceso de caracterización física con el fin de conocer sus propiedades estructurales y garantizar la calidad del material analizado. Para ello se utilizaron técnicas como la difracción de rayos X, que permite determinar su composición y estructura cristalina, así como el análisis de adsorción de gases Brunauer-Emmett-Teller (BET), empleado para medir el área superficial específica y la porosidad del material, y la microscopía electrónica de barrido (SEM), que permite observar detalles de su morfología y textura (figura 4). Este paso resulta determinante, ya que las características físicas de la ZC pueden influir de manera directa en su comportamiento y en su posible interacción con microorganismos.

Medir lo invisible

Una vez caracterizada, la ZC comenzó a ser evaluada mediante ensayos *in vitro* para analizar su actividad antimicrobiana frente a patógenos de relevancia clínica. A través de este tipo de estudios es posible obtener información precisa sobre su capacidad para inhibir el crecimiento bacteriano y sentar las bases para investigaciones posteriores.

La actividad antibacteriana de la ZC fue evaluada en una matriz líquida al 2 % frente a *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Staphylococcus aureus* (ATCC 23923) y *Salmonella* spp. (ATCC 700623). Para analizar su efecto sobre el crecimiento bacteriano se emplearon dos técnicas complementarias de uso común en microbiología, que permiten estimar la cantidad de bacterias presentes en un cultivo desde enfoques distintos.

La primera fue la técnica de densidad bacteriana, un método rápido que consiste en medir qué tan “turbio” se vuelve un cultivo líquido: a mayor número de bacterias, mayor es la turbidez del medio. Esta técnica permite obtener una estimación general del crecimiento bacteriano y comparar los cultivos sin tratamiento (grupo control, GC) con aquellos expuestos a la ZC al 2 % (grupo con ZC, GZ).

La segunda técnica fue la determinación de unidades formadoras de colonias (UFC), un método más específico que permite contar cuántas bacterias vivas son capaces de multiplicarse y formar colonias visibles en un medio sólido. En términos sencillos, cada colonia observada corresponde a una bacteria que logró sobrevivir y reproducirse, lo que brinda una medida directa de la viabilidad bacteriana.

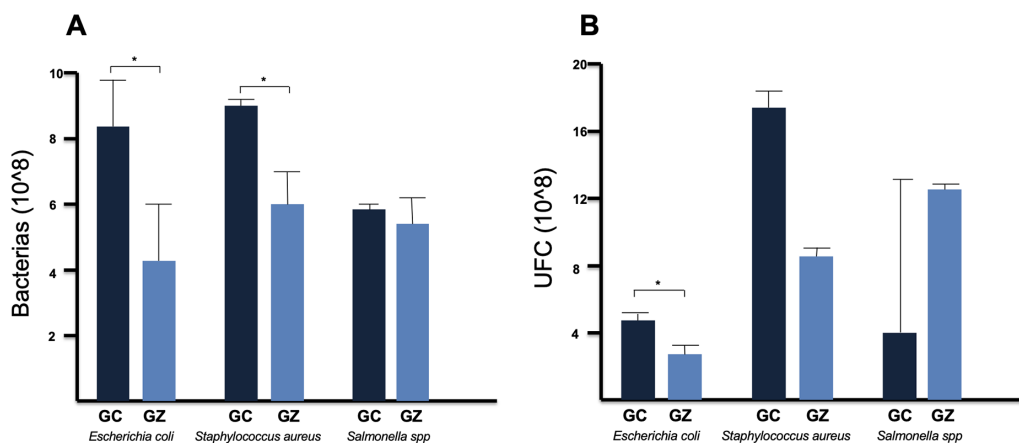
Respuestas distintas, un mismo material

Los resultados obtenidos mediante ambas técnicas mostraron un comportamiento consistente. En el caso de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, la adición de ZC al 2 % se asoció con una disminución significativa en el crecimiento bacteriano, en comparación con el grupo control. Esta reducción fue observable tanto en la densidad bacteriana como en el número de unidades formadoras de colonias (figura 5).

Por el contrario, *Salmonella* spp. ATCC 700623 no presentó cambios apreciables en su crecimiento bajo las mismas condiciones experimentales, lo que indica que el efecto antibacteriano de la zeolita no es uniforme y depende del tipo de microorganismo evaluado.

Figura 5. Evaluación de la proliferación bacteriana *in vitro*. (A) Técnica de densidad bacteriana. (B) Técnica de unidad formadora de colonias (UFC). GC: grupo control; GZ: grupo con ZC al 2 % m/v. Los datos se presentan como media y desviación estándar.

* Estadístico de t de Student. La diferencia es significativa $p < 0.05$.



Este comportamiento diferencial observado entre las bacterias evaluadas concuerda con reportes previos que describen una actividad antimicrobiana selectiva de la ZC, dependiente tanto de la especie bacteriana como de sus características estructurales y fisiológicas (Özogul et al., 2018). La capacidad de la ZC para inhibir el crecimiento de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, pero no de *Salmonella spp.*, sugiere que su mecanismo de acción no es universal, sino que responde a interacciones específicas entre la superficie de la zeolita y la pared celular bacteriana.

Estos hallazgos no sólo refuerzan la evidencia sobre el potencial antimicrobiano de la ZC, sino que también subrayan la relevancia de estudiar materiales naturales de origen mexicano como alternativas o coadyuvantes frente al creciente problema de la resistencia bacteriana a los antibióticos convencionales. En un contexto donde las opciones terapéuticas se vuelven cada vez más limitadas, la exploración científica de recursos minerales nacionales abre nuevas rutas para el desarrollo de estrategias accesibles en el control de infecciones, al tiempo que fortalece la investigación científica realizada en México.

Cierre: lo que aún está en juego

La resistencia a los antimicrobianos representa una de las amenazas más críticas para la salud pública a nivel global, agravada por el uso inadecuado y excesivo de estos fármacos. En este contexto, la exploración de alternativas no convencionales, como la ZC, se perfila como una vía prometedora para el desarrollo de nuevas herramientas en la prevención y el control de infecciones bacterianas resistentes a los antibióticos tradicionales.

Los resultados preliminares obtenidos en esta evaluación *in vitro* sugieren que la ZC presenta una actividad antibacteriana selectiva frente a patógenos de

relevancia clínica. Si bien estos hallazgos requieren ser ampliados mediante estudios adicionales que profundicen en sus mecanismos de acción, eficacia y seguridad, constituyen un primer paso en la generación de evidencia científica en este campo.

En este sentido, los esfuerzos desarrollados en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí contribuyen al posicionamiento de la investigación nacional en el estudio de materiales naturales con posible aplicación biomédica, impulsando líneas de trabajo que buscan abrir camino en el análisis del uso de zeolitas mexicanas frente a la resistencia antimicrobiana. Finalmente, la articulación entre la riqueza de recursos naturales del país y la investigación científica de calidad ofrece una oportunidad para que México contribuya al desarrollo de soluciones con alcance en la salud pública global.

Referencias

- ❖ Cerbu, C., Ilaş, V. A., Czopowicz, M., Potârniche, A. V., Bodart-Nieva, E.-P., Mureşan, E. A., Kaba, J., Spinu, M., y Pall, E. (2020). The use of activated micronized zeolite clinoptilolite as a possible alternative to antibiotics and chestnut extract for the control of undifferentiated calf diarrhea: An *in vitro* and *in vivo* study. *Animals*, 10(12), 2284. <https://doi.org/10.3390/ani10122284>
- ❖ Fleming, A. (1945). *Banquet speech*. Nobel Prize Outreach. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1945/fleming/speech/>
- ❖ Holmes, A. H., Moore, L. S. P., Sundsfjord, A., Steinbakk, M., Regmi, S., Karkey, A., Guerin, P. J., y Piddock, L. J. V. (2016). Understanding the mechanisms and drivers of antimicrobial resistance. *The Lancet*, 387(10014), 176–187. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)00473-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)00473-0)
- ❖ Jha, B., y Singh, D. N. (2016). *Fly ash zeolites*. Springer.
- ❖ Karaman, R., Jubeh, B., y Breijyeh, Z. (2020). Resistance of Gram-positive bacteria to current antibacterial agents and overcoming approaches. *Molecules*, 25(12), 2888. <https://doi.org/10.3390/molecules25122888>
- ❖ Kraljević Pavelić, S., Simović Medica, J., Gumbarević, D., Filošević, A., Pržulj, N., y Pavelić, K. (2018). Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications *in vivo*. *Frontiers in Pharmacology*, 9, 1350. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01350>
- ❖ Mastinu, A., Kumar, A., Maccarinelli, G., Bonini, S. A., Premoli, M., Aria, F., Gianoncelli, A., y Memo, M. (2019). Zeolite clinoptilolite: Therapeutic virtues of an ancient mineral. *Molecules*, 24(8), 1517. <https://doi.org/10.3390/molecules24081517>



- ❖ McEwen, S. A., y Fedorka-Cray, P. J. (2002). Antimicrobial use and resistance in animals. *Clinical Infectious Diseases*, 34(Supl. 3), S93–S106. <https://doi.org/10.1086/340246>
- ❖ Novo Fernández, R., y Costafreda Mustelier, J. L. (2018). Las zeolitas naturales de México. En J. L. Costafreda Mustelier, D. A. Martín Sánchez y J. L. Costafreda Velázquez (Eds.), *Las zeolitas naturales de Iberoamérica* (pp. 280–321). Fundación Gómez Pardo. https://oa.upm.es/50786/1/zeolitas_Mexico.pdf
- ❖ Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2015). *Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos*. <https://www.who.int/publications/item/9789241509763>
- ❖ Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2019). *La resistencia a los antimicrobianos*. OMS.
- ❖ Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2021). *Resistencia antimicrobiana*.
- ❖ Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*. Naciones Unidas. https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf
- ❖ Özogul, F., Šimat, V., Gokdogan, S., Regenstein, J. M., y Özogul, Y. (2018). Effect of natural zeolite (clinoptilolite) on in vitro biogenic amine production by Gram positive and Gram negative pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2585. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02585>
- ❖ Panaiotov, S., Tancheva, L., Kalfin, R., y Petkova-Kirova, P. (2024). Zeolite and neurodegenerative diseases. *Molecules*, 29(11), 2614. <https://doi.org/10.3390/molecules29112614>
- ❖ Raoofi, S., Pashazadeh Kan, F., Rafiei, S., Hosseinipalangi, Z., Noorani Mejareh, Z., Khani, S., Abdollahi, B., Seyghalani Talab, F., Sanaei, M., Zarabi, F., Dolati, Y., Ahmadi, N., Raoofi, N., Sarhadi, Y., Masoumi, M., Sadat Hosseini, B., Vali, N., Gholamali, N., Asadi, S., y Ghashghaee, A. (2023). Global prevalence of nosocomial infection: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 18(1), e0274248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274248>
- ❖ Saha, S., Sajib, M. S. I., Garrett, D., y Qamar, F. N. (2020). Antimicrobial resistance in typhoidal *Salmonella*: Around the world in 3 days. *Clinical Infectious Diseases*, 71(Supl. 2), S91–S95. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa366>
- ❖ Shariati, A., Dadashi, M., Chegini, Z., van Belkum, A., Mirzaii, M., Khoramrooz, S. S., y Darban-Sarokhalil, D. (2020). The global prevalence of daptomycin-, tigecycline-, quinupristin/dalfopristin-, and linezolid-resistant *Staphylococcus aureus* and coagulase-negative staphylococci strains: A systematic review and meta-analysis. *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, 9(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s13756-020-00714-9>



- ❖ Van Boeckel, T. P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B. T., Levin, S. A., Robinson, T. P., Teillant, A., y Laxminarayan, R. (2015). Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(18), 5649–5654. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112>
- ❖ Yao, G., Lei, J., Zhang, W., Yu, C., Sun, Z., Zheng, S., y Komarneni, S. (2019). Antimicrobial activity of X zeolite exchanged with Cu²⁺ and Zn²⁺ on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2782–2793. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3750-z>