

Recepción: 15.11.2025

Revisión: 30.12.2025

Publicación: 15.01.2026

<https://orcid.org/0009-0001-7597-2635>

<https://orcid.org/0000-0002-1932-8757>

# ZEOLITAS NANOESTRUCTURADAS: APLICACIONES BIOMÉDICAS Y POTENCIAL TERAPÉUTICO EN ENFERMEDADES CRÓNICAS

## NANOSTRUCTURED ZEOLITES: BIOMEDICAL APPLICATIONS AND THERAPEUTIC POTENTIAL IN CHRONIC DISEASES

Lizbeth Mota Magaña<sup>1</sup>

Miguel Ángel Hernández Espinosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de Doctorado en Investigación y Educación para la Salud, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Pue. México

<sup>2</sup>Departamento de Investigación en Zeolitas, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Pue. México

Correos:

[mm224570423@alm.buap.mx](mailto:mm224570423@alm.buap.mx)

## Resumen

Las zeolitas son minerales que pueden originarse a partir de formaciones rocosas o ser sintetizados en el laboratorio, y se caracterizan por una amplia diversidad de aplicaciones. Su composición química les confiere una alta capacidad de absorción y de intercambio iónico. Además, su estructura cristalina ordenada en una red tridimensional de microporos las convierte en excelentes materiales de soporte y vehículos para diversas sustancias. Estas propiedades han sido ampliamente aprovechadas en la industria y en la agricultura. No obstante, a pesar de ser materiales inorgánicos, su uso también se ha explorado en aplicaciones animales y humanas, particularmente en el ámbito de la salud y la biomedicina. El avance reciente en su estudio ha permitido evaluar su utilidad en el tratamiento de enfermedades crónicas como la diabetes. Algunos trabajos sugieren que puede contribuir con el control de la glucosa, y en el caso de las complicaciones asociadas, favorecer el proceso de cicatrización en úlceras por pie diabético, gracias a su efecto hemostático y de reparación tisular. A la luz de la evidencia disponible, las zeolitas se presentan como una alternativa prometedora para el desarrollo de nuevas herramientas terapéuticas con aplicaciones biomédicas diversas.

**Palabras clave:** aplicaciones biomédicas, zeolitas nanoestructuradas, enfermedades crónicas.

## Abstract

Zeolites are minerals that can be formed from rock sediments or be synthesized in a laboratory. They have a wide variety of applications. Their chemical composition gives them a high absorption and ion-exchange capacity. Furthermore, their ordered, three-dimensional crystalline structure consisting of micropores makes them excellent support materials and vehicles for various substances, and these properties are widely exploited in industry and agriculture. However, despite being inorganic materials, zeolites have also been explored for use in animal and human applications, particularly in health and biomedicine. Recent advances in their study have enabled their potential usefulness in treating chronic diseases such as diabetes to be evaluated. Some studies suggest that zeolites can contribute to glucose control and promote the healing process in diabetic foot ulcers in the event of associated complications, thanks to their hemostatic and tissue repair effects. Available evidence suggests that zeolites are a promising alternative for developing new therapeutic tools with diverse medical applications.

**Keywords:** biomedical applications, nanostructured zeolites, chronic diseases.

## Introducción

Las zeolitas son minerales porosos, conformados principalmente por aluminosilicatos. Su estructura se organiza por marcos tridimensionales bien definidos, integrados por átomos de oxígeno (O), aluminio (Al) y silicio (Si). Esta arquitectura les otorga propiedades únicas, como la capacidad de funcionar como tamices moleculares, útiles para purificar o separar sustancias, así como una notable absorción de agua y un intercambio iónico muy específico (Derakhshankhah et al., 2020; Serati-Nouri et al., 2020). Esta estructura que se forma resulta en una red interconectada de poros, que resulta química y biológicamente muy conveniente.

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), los poros de las zeolitas pueden clasificarse en tres categorías según su tamaño (figura 1): macroporos con diámetros mayores a 50 nm, mesoporos, de 2 a 50 nm y microporos, menores a 2 nm. En general, las partículas menores a 100 nm se consideran sólidos porosos de tamaño nanométrico (Derakhshankhah et al., 2020).

Una característica clave es la relación silicio/aluminio (Si/Al), que define si una zeolita es más hidrofílica o hidrofóbica, su estabilidad frente a compuestos ácidos y su capacidad de intercam

bio iónico. Al igual que sucede con materiales arcillosos, sus propiedades pueden modificarse o adaptarse para sus diferentes usos (Souza et al., 2023).

Las zeolitas pueden ser naturales o sintéticas. Las naturales de yacimientos bien identificados y hasta ahora se han documentado alrededor de 40 tipos, principalmente en rocas volcánicas y sedimentarias. Entre las más utilizadas destacan la chabazita, clinoptilolita y mordenita. En contraste, ya se han desarrollado cerca de 200 zeolitas sintéticas, las cuales tienen amplios usos industriales como la catálisis, adsorción en procesos petroquímicos detergentes, tratamiento de aguas residuales, captura de metales pesados, separación de gases o liberación controlada de nutrientes y otros compuestos en agricultura (Serati-Nouri et al., 2020; Pandya et al., 2024).

Más recientemente, las aplicaciones de las zeolitas se han expandido hacia los campos biológico y biomédico. Debido a su baja citotoxicidad, su capacidad de liberar sustancias de manera controlada y su alta adaptabilidad para cargar compuestos en sus poros, han impulsado su uso en veterinaria, zootecnia y diversas áreas de la salud humana, donde se investigan como alternativas para problemas clínicos complejos (Souza et al., 2023).

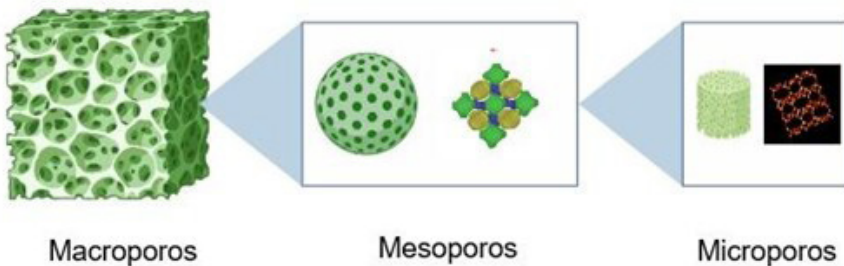


Figura 1. Representación de las estructuras derivadas de las zeolitas.

Creado con BioRender <https://BioRender.com>

Una de las zeolitas más prometedoras para aplicaciones biológicas es la clinoptilolita. ( $K_2Na_2Ca(Al_6Si_3O_{72}) \cdot 21H_2O$ ). Esta es la zeolita natural más común y se reconoció como especie mineral en 1932 por su similitud química con la modernita. Durante décadas se le confundió con heulandita ( $NaCa_4(Al_9Si_27O_{72}) \cdot 24H_2O$ ), hasta que se comprobó que comparten la misma estructura cristalina, aunque con distinta composición (Grifasi et al., 2024).

La clinoptilolita posee una estructura laminar con cavidades que alojan moléculas de agua y cationes intercambiables. Esto le confiere una alta capacidad de intercambio iónico y permite su deshidratación térmica sin que su estructura se vea alterada. Su red tridimensional (figura 2) incluye canales de distintos tamaños, lo que define su capacidad para alojar o filtrar moléculas según su diámetro (Grifasi et al., 2024). Además, presenta una gran ventaja ante medios

ácidos, lo cual es especialmente relevante en los sistemas biológicos (Kraljević Pavelić et al., 2017).

Entre las propiedades más destacadas se encuentran su alta afinidad y capacidad de tamizaje molecular, adsorción de agua, remoción de iones de amonio y toxinas urémicas, así como su potencial como biosensor o como vehículo para transportar diversas moléculas (Kraljević Pavelić et al., 2017).

Gracias a estas características, se ha descrito que la clinoptilolita puede actuar como detoxificante, modulador del sistema inmunológico, inhibidor del crecimiento de algunos patógenos, regulador de la microbiota, coadyuvante en terapias antitumorales y en vacunas, además de servir como base para enzimas miméticas (Kraljević Pavelić et al., 2017).

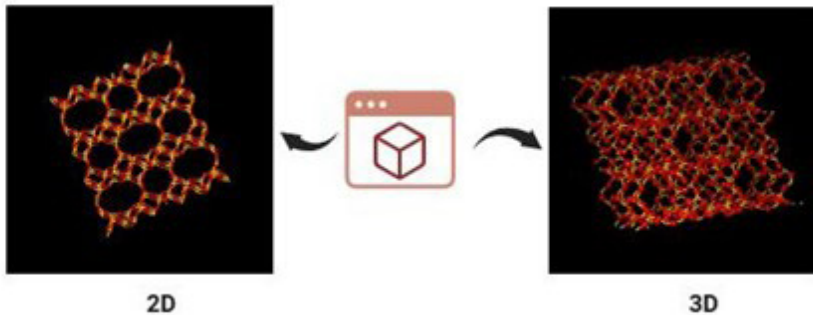


Figura 2. Representación 2D y 3D de la estructura de la clinoptilolita. Obtenido de Structure Commission of the International Zeolite Association. <https://america.iza-structure.org/>. Creado con BioRender <https://BioRender.com>

### Aplicaciones clínicas y biomédicas de las zeolitas

Las zeolitas tienen una amplia variedad de aplicaciones en el ámbito médico y clínico, muchas de las cuales continúan en investigación (figura 3). Una de las más prometedoras es su uso en la liberación controlada de fármacos. Debido a su estructura porosa, las zeolitas pueden funcionar como base para desarrollar nanopartículas, capa-

ces de encapsular y administrar medicamentos o compuestos bioactivos. Entre las zeolitas más empleadas para este propósito, se encuentran la clinoptilolita y la faujasita (Pandya et al., 2024).

Tradicionalmente, se consideraba que los materiales inorgánicos no eran compatibles como

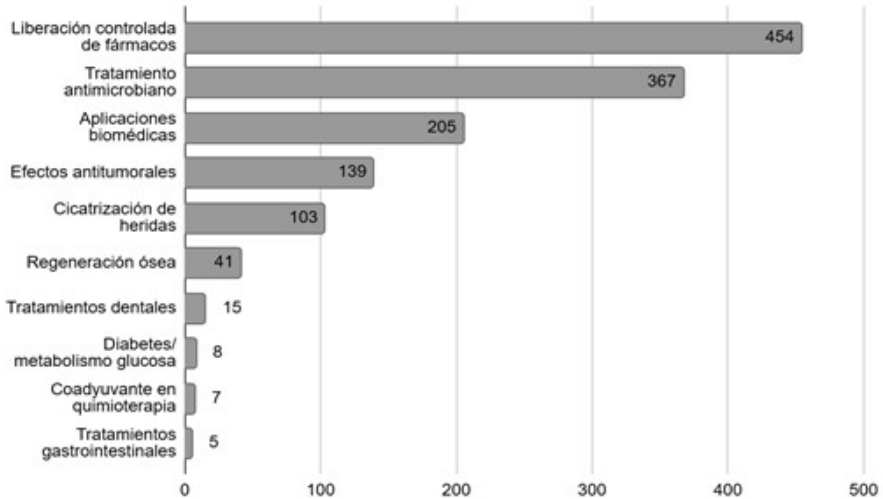


Figura 3. Estudios de aplicación de compuestos nanoestructurados de zeolitas con aplicaciones biomédicas

Nota: Elaboración propia. En la figura se representa la frecuencia absoluta de los estudios encontrados en una revisión sistemática con búsquedas de 2019-2024 en las bases de datos de Web of Science, Scopus y Pubmed. El proceso de cribado y selección de estudios se realizó con los lineamientos de la declaración PRISMA.

soportes o vehículos de fármacos, sin embargo, cuando las zeolitas se presentan en forma de nanoporos, ofrecen una gran superficie de contacto, lo que facilita la agregación y el transporte de diferentes moléculas terapéuticas (Derakhshankhah et al., 2020).

Gracias a estas propiedades, las zeolitas pueden funcionar como soporte de enzimas, anticuerpos y otros compuestos que requieren de una liberación lenta y sostenida para mejorar su eficacia. También permiten la creación de materiales híbridos, donde una matriz inorgánica sostiene compuestos orgánicos, favoreciendo así un mejor desempeño de los fármacos administrados (Hernández-Espinosa et al., 2024; Hao et al., 2021).

No obstante, para que las zeolitas sean consideradas nanosopores en sistemas biológicos, es fundamental evaluar su citotoxicidad, ya que algunos tipos pueden resultar peligrosos para la salud humana y animal. En particular, ciertas zeolitas fibrosas como la erionita, escolecita y ofretita, pueden alterar la organización celular y la función mitocondrial, lo que las convierte en potentes agentes cancerígenos. De la misma forma se han observado diferencias en cuanto a la toxicidad de las zeolitas en su forma micro-métrica y nanométrica (Hao et al., 2021).

En contraste, otras zeolitas muestran baja toxicidad, y por lo tanto, mayor potencial para aplicaciones biomédicas. Entre ellas se encuentra la clinoptilolita y algunas zeolitas sintéticas tipo ZIF, que se consideran más seguras para su uso en sistemas biológicos.

## Aplicaciones de zeolitas en el control de la diabetes y del metabolismo de la glucosa

Las enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT), como las enfermedades cardiovasculares, diversos tipos de cáncer, padecimientos respiratorios, diabetes, obesidad y algunos trastornos mentales, representan uno de los principales desafíos de la salud pública a nivel mundial (Budreviciute et al., 2020). Debido a su carácter crónico, requieren de tratamientos continuos basados en medicamentos, cambios en el estilo de vida y, cada vez más, en la innovación tecnológica para desarrollar nuevas terapias.

En el caso de la diabetes, el objetivo central del tratamiento es mantener bajo control el metabolismo de la glucosa, generalmente mediante fár-

macos y sustancias con efecto hipoglucemiante. Dentro de este campo, las zeolitas, y en particular la clinoptilolita, han comenzado a estudiarse por su papel complementario en la regulación de la glucosa. No obstante, la evidencia disponible hasta ahora proviene principalmente de estudios *in vitro* y ensayos preclínicos en modelos animales, por lo que aún no se puede considerar una aplicación clínica establecida.

En la tabla 1 se resumen algunos de los estudios más recientes que exploran el uso de zeolitas naturales y sintéticas en el control de la glucosa y otros parámetros metabólicos.

Tabla 1. Estudios con la aplicación de zeolitas naturales en el control de la glucosa o parámetros metabólicos

Autor y año	Tipo de estudio	Modelo	Tratamiento	Resultados principales
Omidi et al., (2019)	Estudio experimental preclínico del efecto de la clinoptilolita nanométrica natural (NCLN) y como comino negro <i>Nigella sativa</i> (NS).	Animal: Ratas diabéticas Vs Ratas no diabéticas	Suplementación de (NCLN), (NS) o su combinación, acompañada de una dieta rica en grasas  <b>Duración:</b> 1 mes  <b>Efecto esperado:</b> niveles de glucemia en ayuno y perfil de lípidos (TG, CT, C-LDL)	Reducción de la glucemia, sin efecto en el perfil de lípidos  No hubo diferencias al combinar la zeolita con el comino negro, en comparación con la clinoptilolita sola.
Markoska et al., (2023)	Estudio <i>In vivo</i> e <i>In vitro</i> de las propiedades de adsorción de D-glucosa en interacción con zeolitas	<i>In vitro</i> : Modelo intestinal  Animal: Ratones	<i>In vitro</i> : Se mezcló glucosa con clinoptilolita natural y tres zeolitas sintéticas. Medición de glucosa antes y después con técnicas avanzadas de análisis.  <i>In vivo</i> : Se repitió el experimento administrando la mezcla en ratones vía oral  <b>Efecto esperado:</b> absorción de glucosa a y sus niveles en sangre.	Adsorción de la glucosa y reducción en los niveles de sangre

<p><b>Kubo &amp; Kawai (2021)</b></p>	<p>Estudio experimental pre-clínico sobre la seguridad de una zeolita natural (clinoptilolita y mordenita) en un modelo animal de diabetes tipo 2</p>	<p>Animal: Ratones diabéticos.</p>	<p>Administración de la mezcla de zeolitas disueltas en agua por vía oral, en dosis controladas</p> <p><b>Duración:</b> 14 días</p> <p><b>Efecto esperado:</b> niveles de glucemia, tolerancia oral a la glucosa, % HbA1c y lípidos en sangre y daño en órganos</p>	<p>Reducción de la glucosa, lípidos y %HbA1c</p> <p>No se encontraron daños en órganos de ratones tratados.</p>
---------------------------------------	---	------------------------------------	---	---

NOTA: Elaboración propia a partir de la información extraída de los estudios citados. Triglicéridos (TG). Colesterol Total (CT). Colesterol en Lipoproteínas de baja densidad (C-LDL). Hemoglobina glucosilada (HbA1c).

### Aplicaciones de zeolitas en la cicatrización de heridas

Otra de las áreas más prometedoras para el uso de las zeolitas es en la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa. Gracias a su estructura nanoporosa, estos materiales pueden influir en el comportamiento de células y tejidos, modificando procesos de adhesión celular, la energía superficial y el microambiente necesario para favorecer la regeneración de los tejidos dañados (Zarrintaj et al., 2020).

La ingeniería tisular también abarca el desarrollo de materiales para la cicatrización de heridas, campo de gran relevancia clínica. Un caso particularmente desafiante es el de las úlceras por pie diabético, donde la herida se desarrolla en un microambiente alterado por la hiperglucemia, la falta de irrigación sanguínea, la hipoxia, la inflamación crónica, las infecciones persistentes

y las variaciones del pH (Hernández et al., 2021; Huang et al., 2023).

En los últimos años, la nanotecnología ha permitido crear sistemas de liberación controlada de fármacos que ayudan a enfrentar estos retos. Los nanosistemas pueden favorecer la cicatrización de heridas mediante dos vías principales (Huang et al., 2023):

1. La actividad química propia de los nanomateriales
2. La administración dirigida de compuestos antibióticos, antiinflamatorios, hipoglucemiantes, enzimas o incluso células madre

### Zeolitas como agentes hemostáticos

Entre los mecanismos más estudiados está el efecto hemostático de ciertas zeolitas. Su alta higroscopicidad les permite detener el sangrado rápidamente al absorber agua y concentrar elementos sanguíneos. Además, pueden liberar  $Ca^{2+}$ , que intervienen en la activación de la cascada de coagulación (Yu & Zhong, 2021).

Estas propiedades han impulsado el desarrollo de materiales hemostáticos basados en zeolitas. Uno de los más conocidos es el QuickClot®,

elaborado con faujasita nanométrica intercambiada con calcio, que ha demostrado eficacia en modelos animales (Yu & Zhong, 2021). Aunque algunos materiales pueden generar calor excesivo y dañar tejidos, zeolitas como la clinoptilolita, la faujasita y la sepiolita han mostrado perfiles de seguridad favorables a heridas agudas (Jiang et al., 2023).

## Evidencia reciente sobre zeolitas en cicatrización

En la tabla 2 se resumen los estudios más representativos sobre el uso de zeolitas naturales en la cicatrización de heridas. La mayoría corresponde a modelos preclínicos y

solo unos pocos han avanzado a ensayos clínicos fase I, como el estudio pionero realizado por Deinsberger et al., (2022).

Tabla 2. Estudios con la aplicación de zeolitas naturales en los procesos de cicatrización

Autor y año	Tipo de estudio	Modelo	Tratamiento	Resultados principales
Pamuk et al., (2025)	Estudio comparativo <i>In vivo</i> del efecto del bálsamo resinoso <i>Myroxylon pereirae</i> (MP), Fenitoína (F) o clinoptilolita (C)	Animal: Ratas con fístula faringocutánea	<p>Aplicación de tratamientos a cuatro grupos de ratas: tres recibieron un tratamiento (MP, F o C) y uno fue grupo control</p> <p><b>Duración:</b> Al tercer día de crear la herida quirúrgica, se aplicaron los tratamientos</p> <p><b>Efecto esperado:</b> Al décimo día se analizó la progresión de la herida: inflamación, formación de nuevos vasos sanguíneos, producción de colágeno y actividad de fibroblastos (células de reparación)</p>	<p>Efecto cicatrizante comparable a otros tratamientos.</p> <p>La clinoptilolita mostró efecto positivo por sí sola</p> <p>Se podría mejorar su efecto si actuará como vehículo de otro compuesto como antibiótico o un cicatrizante</p> <p>Reduce la producción de aminas biógenas</p>
Samadian et al., (2023)	Estudio <i>In vivo</i> de los efectos antibacteriano y regenerativo de un gel a base de clinoptilolita y alginato	Animal: Ratas con quemaduras	<p><i>Aplicación de tratamientos a tres grupos de ratas a las que se les indujo una quemadura: alginato, clinoptilolita + alginato, sin tratamiento especial.</i></p> <p><b>Duración:</b> 7 y 14 días</p> <p><b>Efecto esperado:</b> antibacteriano, compatibilidad con células sanguíneas, regeneración de células.</p>	<p>Mejoría en la inflamación y la regeneración.</p> <p>El compuesto no mostró efecto antibacteriano por sí solo</p> <p>Mejoró el proceso de inflamación</p> <p>No dañó las células sanguíneas</p> <p>Se sugiere la agregación de un antibiótico</p>
Deinsberger et al. (2022)	Ensayo clínico fase I Aplicación de un polvo de clinoptilolita purificada (TCP) en sujetos sanos para evaluar la cicatrización	Humano: 12 sujetos voluntarios	<p>Aplicación de tratamientos a dos grupos de sujetos a los que se les realizó una pequeña herida en la piel: uno al que se le aplicó solución salina y al otro TCP</p> <p><b>Duración:</b> 29 días, con curación cada 2 días hasta el día 14. Revisión de la herida los días restantes</p> <p><b>Efecto esperado:</b> Proceso de cicatrización (aparición de la herida, inflamación, infección)</p>	<p>Cicatrización normal en ambos grupos sin enrojecimiento, inflamación ni infección</p> <p>No se presentaron reacciones adversas en el grupo de TCP</p> <p>Se consideró que la aplicación del TCP fue seguro y bien tolerado</p>

(Jiang et al., 2023)	Estudio <i>In vitro</i> e <i>In vivo</i> de la aplicación de sepiolita con nanopartículas de plata (AgNPs) en el proceso de cicatrización	Animal: Ratas con incisión de vena caudal y conejos con incisión de vena femoral y carotídea	Aplicación de tratamientos a grupos de ratas y conejos: los que recibieron sepiolita+AgNPs con diferentes tratamientos o no. <b>Duración:</b> Inmediato a la realización de la herida y seguimiento hasta 12 días <b>Efecto esperado:</b> Tiempo de sangrado, cicatrización de la herida (síntesis de colágeno)	El compuesto de sepiolita+AgNPs detuvo el sangrado más rápido y estimula la cicatrización de heridas al estimular la síntesis de colágeno
----------------------	---	---	---	---

NOTA: Elaboración propia a partir de la información extraída de los estudios citados.

## Posibles mecanismos beneficiosos

Diversas publicaciones sugieren que las zeolitas pueden ofrecer tratamiento de heridas complejas debido a:

- Su capacidad de absorción de aminos biógenas, responsables del mal olor en heridas crónicas;
- Su actividad microbiana cuando se combinan con nanopartículas de plata u otros compuestos bioactivos;
- Su contribución a la hemostasia, gracias a su rápida absorción de fluidos y la activación de la coagulación;
- Su posible papel como acarreadores de antibióticos o moléculas regenerativas, mejorando su liberación en el sitio de la herida.

En resumen, estos mecanismos convierten a las zeolitas, especialmente la clinoptilolita y ciertos compuestos híbridos, en candidatos atractivos para el diseño de apósitos avanzados y terapias regenerativas. Sin embargo, aún se requieren más estudios clínicos para confirmar su eficacia y seguridad en heridas crónicas y en poblaciones con comorbilidades complejas.

## Conclusión

Las aplicaciones biomédicas de las zeolitas abarcan una amplia variedad de funciones, entre ellas su uso como acarreadores de sustancias, agentes antimicrobianos, materiales hemostáticos, y como componentes en tratamientos de regeneración de tejidos. Más recientemente, también se ha explorado su papel en el control de la glucosa. En este sentido, en el tratamiento de la diabetes, las zeolitas, particularmente la clinoptilolita debido a su perfil de seguridad, podría contribuir con el control de la glucemia mediante mecanismos de absorción y modulación metabólica. Asimismo, su potencial uso como apoyo en la cicatrización en úlceras por pie diabético ofrece una vía adicional para abordar complicaciones comunes de la enfermedad. No obstante, la mayoría de los estudios disponibles se han realizado en modelos experimentales *in vitro* e *in vivo*, y solo unos cuantos han demostrado su efectividad y seguridad en ensayos clínicos bien diseñados.

## Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

## Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

**Los autores se descargan de responsabilidad** (INTELIGENCIA ARTIFICIAL) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (*ChatGPT, COPILOT, etc.*) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

## Agradecimientos

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado en el desarrollo del programa de Doctorado en Investigación y Educación para la Salud, beca No. 4052751

## Referencias

- Budreviciute, A., Damiati, S., Sabir, D. K., Onder, K., Schuller-Goetzburg, P., Plakys, G., Katileviciute, A., Khoja, S., & Kodzius, R. (2020). Management and Prevention Strategies for Non-communicable Diseases (NCDs) and Their Risk Factors. *Frontiers in Public Health*, 8, 574111. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.574111>
- Deinsberger, J., Marquart, E., Nizet, S., Meisslitzer, C., Tschegg, C., Uspenska, K., Gouya, G., Niederdöckl, J., Freissmuth, M., Wolzt, M., & Weber, B. (2022). Topically administered purified clinoptilolite tuff for the treatment of cutaneous wounds: A prospective, randomised phase I clinical trial. *Wound Repair and Regeneration*, 30(2), 198–209. <https://doi.org/10.1111/wrr.12991>
- Derakhshankhah, H., Jafari, S., Sarvari, S., Barzegari, E., Moakedi, F., Ghorbani, M., Shiri Varnamkhasti, B., Jaymand, M., Izadi, Z., & Tayebi, L. (2020). Biomedical Applications of Zeolitic Nanoparticles, with an Emphasis on Medical Interventions. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 15, 363–386. <https://doi.org/10.2147/IJN.S234573>
- Grifasi, N., Ziantoni, B., Fino, D., & Piumetti, M. (2024). Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33656-5>
- Hao, J., Stavljениć Milašin, I., Batu Eken, Z., Mravak-Stipetic, M., Pavelić, K., & Ozer, F. (2021). Effects of Zeolite as a Drug Delivery System on Cancer Therapy: A Systematic Review. *Molecules*, 26(20), 6196. <https://doi.org/10.3390/molecules26206196>
- Hernández, M. A., Salgado, M. A., Portillo, R., Petranovskii, V., Hernández, G. I., Santamaria, D., & Rubio, E. (2021). Nanoparticles of  $\nu$ -Sitoesterol and Ag on Clinoptilolite Zeolites. *Journal of Nanomaterials*, 2021, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2021/9959552>
- Hernández Espinosa, M. A., Hernández Salgado, G. I., Ignacio Portillo, R., Velasco, Ma. D. L. Á., Santamaria, J. D., & Montserrat, K. (2024). Materiales híbridos en ulceraciones de pie diabético: Nanoderma. *Materiales Avanzados*, 40, 148–153. <https://doi.org/10.22201/iim.ma.2024.40.42>
- Huang, F., Lu, X., Yang, Y., Yang, Y., Li, Y., Kuai, L., Li, B., Dong, H., & Shi, J. (2023). Microenvironment Based Diabetic Foot Ulcer Nanomedicine. *Advanced Science*, 10(2), 2203308. <https://doi.org/10.1002/adv.202203308>
- Jiang, Y., Yang, Y., Peng, Z., Li, Y., Peng, J., Zhang, Y., Jin, H., Tan, D., Tao, L., & Ding, Y. (2023). Sustainable sepiolite-based composites for fast clotting and wound healing. *Biomaterials Advances*, 149, 213402. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213402>
- Kraljević Pavelić, S., Micek, V., Filošević, A., Gumbarević, D., Žurga, P., Bulog, A., Orct, T., Yamamoto, Y., Preočanin, T., Plavec, J., Peter, R., Petravić, M., Vikić-Topić, D., & Pavelić, K. (2017). Novel, oxygenated clinoptilolite material efficiently removes aluminium from aluminium chloride-intoxicated rats in vivo. *Microporous and Mesoporous Materials*, 249, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.04.062>
- Kubo, K., & Kawai, Y. (2021). Zeolite Improves High-Fat Diet-Induced Hyperglycemia, Hyperlipidemia and Obesity in Mice. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 67(5), 283–291. <https://doi.org/10.3177/insv.67.283>
- Markoska, R., Stojković, R., Filipović, M., Jurin, M., Špada, V., Kavre Piltaver, I., Pavelić, K., Marković, D., & Kraljević Pavelić, S. (2023). Study of zeolite clinoptilolite d-glucose adsorption properties in vitro and in vivo. *Chemico-Biological Interactions*, 382, 110641. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2023.110641>
- Omidi, H., Khorram, S., Mesgari, M., Asghari-Jafarabadi, M., & Tarighat-Esfanjani, A. (2019). The effects of natural nano-sized clinoptilolite and Nigella sativa supplementation on blood glucose and lipid profile in rats with type 2 diabetes mellitus. *Progress in Nutrition*, 21(1-S), 147–153. <https://doi.org/10.23751/pn.v21i1-S.5833>
- Pamuk, E., Dogan, E., Kurtulan, O., Güler Tezel, Y. G., & Yiğit, A. A. (2025). Effects of Myroxylon pereirae , Phenytoin, and Clinoptilolite After Pharyngocutaneous Fistula: An Experimental Animal Model. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 172(5), 1656–1663. <https://doi.org/10.1002/ohn.1179>

- Pandya, T., Patel, S., Kulkarni, M., Singh, Y. R., Khodakiya, A., Bhattacharya, S., & Prajapati, B. G. (2024). Zeolite-based nanoparticles drug delivery systems in modern pharmaceutical research and environmental remediation. *Heliyon*, 10(16), e36417. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36417>
- Samadian, H., Vahidi, R., Salehi, M., HosseiniNave, H., Shahabi, A., Zanganeh, S., Lashkari, M., Kouhbananejad, S. M., Rezaei Kolarijani, N., Amini, S. M., AsadiShekaari, M., & MirzaeiParsa, M. J. (2023). Hydrogel nanocomposite based on alginate/zeolite for burn wound healing: In vitro and in vivo study. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 26(6). <https://doi.org/10.22038/ijbms.2023.68897.15016>
- Serati-Nouri, H., Jafari, A., Roshangar, L., Dadashpour, M., Pilehvar-Soltanahmadi, Y., & Zarghami, N. (2020). Biomedical applications of zeolite-based materials: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 116, 111225. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111225>
- Souza, I., García-Villén, F., Viseras, C., & Pergher, S. (2023). Zeolites as Ingredients of Medicinal Products. *Pharmaceutics*, 15(5), 1352. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15051352>
- Yu, P., & Zhong, W. (2021). Hemostatic materials in wound care. *Burns & Trauma*, 9, tkab019. <https://doi.org/10.1093/burnst/tkab019>
- Zarrintaj, P., Mahmodi, G., Manouchehri, S., Mashhadzadeh, A. H., Khodadadi, M., Servatan, M., Ganjali, M. R., Azambre, B., Kim, S., Ramsey, J. D., Habibzadeh, S., Saeb, M. R., & Mozafari, M. (2020). Zeolite in tissue engineering: Opportunities and challenges. *MedComm*, 1(1), 5–34. <https://doi.org/10.1002/mco2.5>