

Aplicación de las zeolitas en la descontaminación del medio ambiente

Escrito por
M. C. María Carmen Maciel Arreola
 mcmaci@ens.cnyn.unam.mx
Dr. Juan Andrés Medina Cervantes
 andres@ens.cnyn.unam.mx

RESUMEN

La contaminación por metales pesados representa uno de los muchos problemas medioambientales que se tiene como reto a resolver con la aplicación de tecnologías eficientes, de bajo costo y accesibles para su solución. Una de las técnicas prometedoras que actualmente tenemos es la utilización de zeolitas naturales y artificiales, que por sus características, como su alta área superficial, capacidad de adsorción e intercambio iónico da como resultado un material interesante en varias aplicaciones, como tamiz molecular, soporte de catalizadores, vehículo en el área farmacéutica, etc. En este trabajo solo se menciona uno de sus usos para la eliminación de metales pesados. Para asegurar y optimizar su uso sostenible y eficiente, es necesario desarrollar investigaciones que expliquen los fenómenos de adsorción y quimisorción relacionados con este tipo de minerales. Este documento ofrece una introducción a las zeolitas, sus características y su potencial como método de remediación de la contaminación.

Palabras clave: zeolitas, medio ambiente, contaminación ambiental, aplicaciones.

ABSTRACT

Heavy metal contamination represents a serious environmental problem that requires the application of efficient, low-cost and accessible technologies for its solution. One promising technique for the environmental cleanup process is the use of natural zeolites as a molecular sieve for the removal of heavy metals. To ensure and optimize their sustainable and efficient use, it is necessary to develop research that explains the adsorption phenomena related to this type of minerals. This paper provides an introduction to zeolites, their characteristics and their potential as a pollution remediation method.

Keywords: zeolites, environment, environmental pollution, applications.

INTRODUCCIÓN

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados de metales alcalinos y alcalinotérreos, tales como Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e iones metálicos (Hristov et al., 2012). Durante su formación, algunos de los compuestos de aluminio son reemplazados por silicatos en la superficie de las zeolitas (figura 1). La figura 1A simboliza un tetraedro con un átomo de Si (punto negro) en el centro y átomos de oxígeno en los vértices; la figura 1B simboliza un tetraedro con un átomo de Al sustituyendo un átomo de Si y unido a un catión monovalente para compen-

Sin Contraseñas

sar la diferencia de carga entre el Si y el Al; y la figura 1C simboliza un átomo para balancear las cargas entre el Al y el Si en una cadena múltiple de tetraedros. Cada una de estas sustituciones crea una carga negativa en la superficie de las zeolitas, que requerirá un catión (ion cargado positivamente como, por ejemplo, el amonio) para balancear las cargas. Mientras mayor sea la densidad de las cargas negativas en la superficie de la zeolita, mayor será su afinidad con el amonio (Bolan et al., 2000; Nguyen et al., 1998).

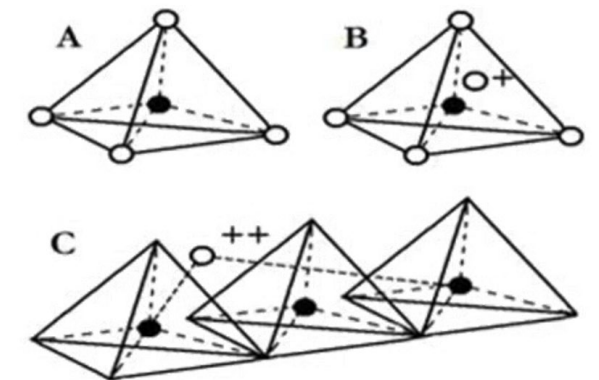


Figura 1. Unidades estructurales básicas de las zeolitas (Wilmer et al., 2006).

Se han identificado alrededor de 40 zeolitas naturales durante los últimos 200 años (tabla 1). La estructura de las zeolitas naturales es notablemente abierta en comparación con otros tectosilicatos como el feldespato y el cuarzo. La estructura cristalina de una zeolita tiene jaulas y túneles (3-13 nm) (figura 2) que débilmente pueden alojar moléculas con tamaños moleculares más pequeños, como es el caso de la molécula de agua, la cual tiene un tamaño de alrededor de 0.27 nm. Debido a esto, se conocen las zeolitas como "tamices moleculares" (Espinosa et al., 2018).

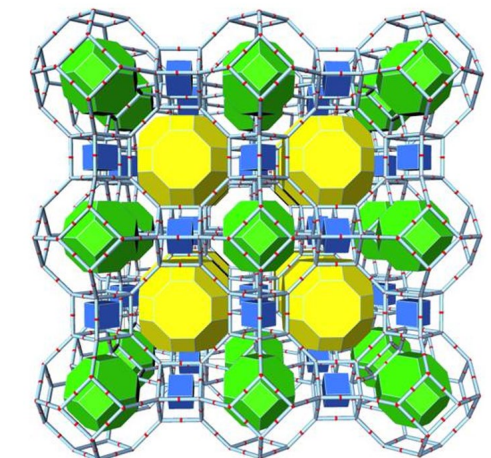


Figura 2. Representación de una zeolita (<https://asdn.net/asdn/chemistry/zeolites.php>).

Las principales zeolitas naturales

Zeolita	Código	Formula química
Laumontita	LAU	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Clinoptilonita	HEU	$(\text{Na},\text{K},\text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al},\text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Stilbita	STI	$\text{NaCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
Phillipsita	PHI	$(\text{K},\text{Na},\text{Ca})_{1-2}(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Erionita	ERI	$(\text{K}_2,\text{Ca},\text{Na}_2)_2\text{Al}_4\text{Si}_{14}\text{O}_{36} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Offretita	OFF	$(\text{K}_2,\text{Ca})_5\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72} \cdot 30\text{H}_2\text{O}$
Faujasita	FAU	$(\text{Na}_2\text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Chabazita	CHA	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Natrolita	NAT	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Thomsonita	THO	$\text{NaCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Mordenita	MOR	$(\text{Ca},\text{Na}_2,\text{K}_2)\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Epistilbita	EPI	$\text{CaAl}_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Analcima	ANA	$\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Heulandita	HEU	$(\text{Na},\text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al},\text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Tabla 1. Principales zeolitas naturales (Luz et al., 1994 e ISA database).

En la figura 3 se observa una imagen de una zeolita tipo mordenita. Las zeolitas naturales y sintéticas se utilizan comercialmente debido a sus propiedades únicas de adsorción, intercambio iónico, tamiz molecular y catalíticas. Estas propiedades visualizan a las zeolitas como un medio para eliminar impurezas metálicas, especialmente porque la estructura de las zeolitas tiene superficies cargadas negativamente adecuadas para la adsorción de metales alcalinotérreos.

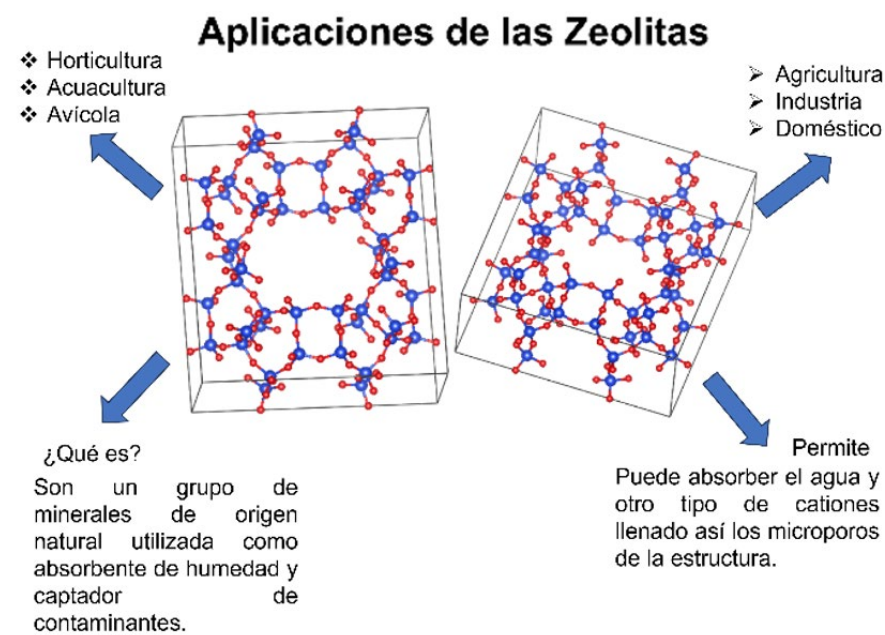


Figura 3. Imagen de una zeolita natural tipo mordenita generada utilizando el software gratuito Vesta.

Las zeolitas son producidas a nivel mundial por Estados Unidos, Rusia, Japón, República Checa, Turquía, Corea del Sur, India, Cuba, Nueva Zelanda y China, siendo el principal productor China. Las vías más importantes de utilización de las zeolitas (figura 3) son las áreas de aplicación industrial (refinado de petróleo, producción de combustibles sintéticos y petroquímica) (Li et al., 2017), ingeniería civil (Franus et al., 2017), tratamiento de aguas residuales (Collins et al., 2020), ecología y protección ambiental (Szerement et al., 2021), uso veterinario y médico (Simona et al., 2019), agricultura (eficacia de los fertilizantes, enmienda del suelo, liberación lenta de herbicidas, trampas de metales pesados, absorción de agua, absorción de gases, actividad antifúngica, mejora de la fotosíntesis en los cultivos, estrés térmico y quemaduras solares de las zeolitas en los cultivos, acuicultura, aditivo para piensos) (Cataldo et al., 2021; De Campos Bernardi et al., 2016; Mahesh et al., 2018).

El presente trabajo pretende exponer algunos de los usos de las zeolitas, con el fin de mostrar los resultados de su utilización y los fines que presenta dicho uso de las zeolitas naturales y su aporte al medio ambiente.

METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se realizó mediante una revisión bibliográfica de artículos publicados sobre aplicaciones de las zeolitas naturales. La estrategia de búsqueda se basa en un análisis de los artículos científicos publicados en Science Direct. A continuación, se estableció un descriptor para realizar la búsqueda bibliográfica: zeolita, material zeolítico, aplicación de zeolitas para descontaminación del medio ambiente. En la figura 4 se muestra una gráfica de la producción científica sobre aplicaciones de zeolitas naturales para remediación del medio ambiente.

Con el objetivo de refinar los resultados obtenidos, se establecieron criterios de búsqueda para la selección de artículos, como fueron título, resumen y resultados, etc.

La última etapa del proceso de selección fue la lectura crítica de los artículos elegidos para eliminar los menos relevantes. Se recopiló información sobre los trabajos considerados de mayor interés en la memoria actual.

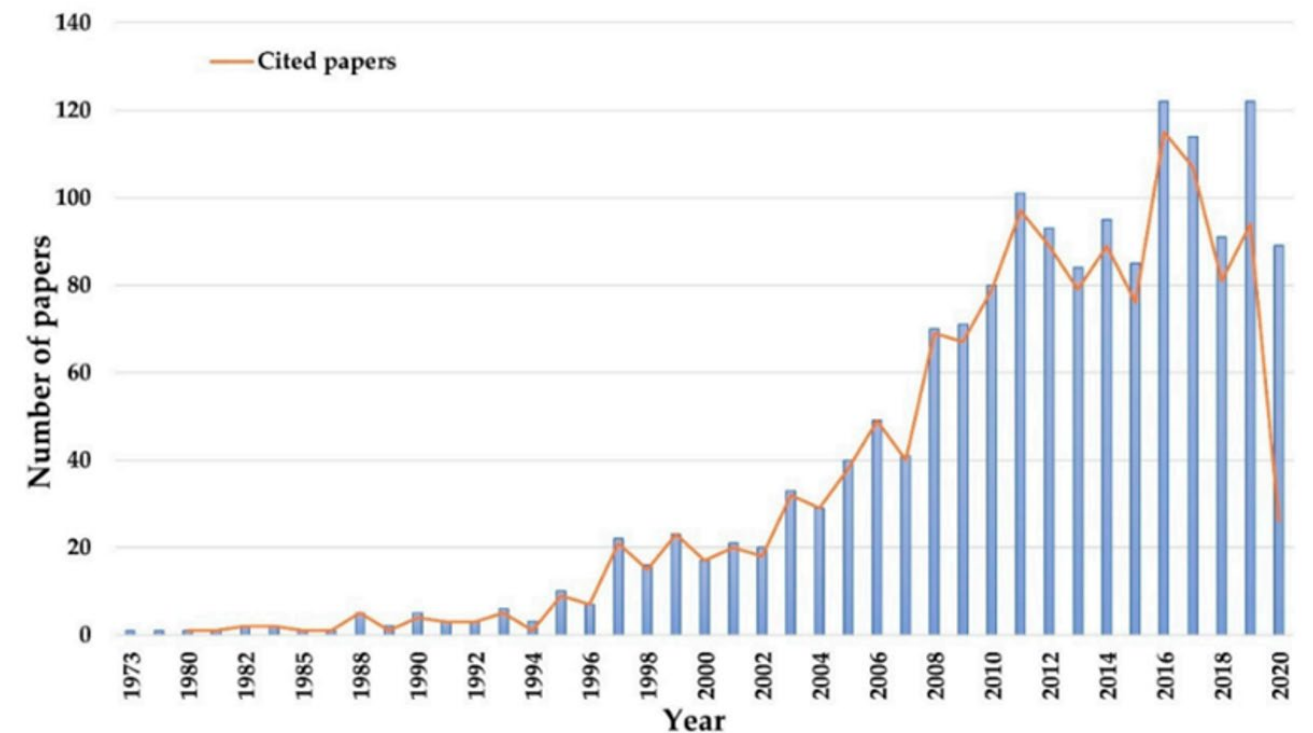


Figura 4. Número de publicaciones relacionadas con la aplicación de las zeolitas en descontaminación del medio ambiente (Morante-Carballo et al., 2021).

DESARROLLO

En la última década, el acceso al agua potable se ha convertido en un reto debido al aumento de las actividades industriales y de la población. Además, el aumento de la demanda de servicios y de la producción de alimentos ha provocado un aumento de los residuos, la contaminación y la degradación de las fuentes naturales de agua, lo que afecta el acceso al agua potable (Darabdhara & Ahmaruzzaman et al., 2022; Manikandan et al., 2022). Los contaminantes que afectan las fuentes naturales de agua son metales pesados (Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Pb, Cr, Mo, Mn, Co, Ni), contaminantes inorgánicos (NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄²⁻), metaloides (B, Si, Te), contaminantes orgánicos (benceno, fenol, tolueno, cloroanilina, pireno, azul de metileno), microorganismos (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*) (Awad et al., 2019; Yadav et al., 2022).

Eliminación de metales pesados

La contaminación de metales pesados en el suelo y los suministros de agua han aumentado constantemente como resultado de la superpoblación y la expansión de las actividades industriales. La presencia de metales pesados en los suministros de agua es motivo de gran preocupación debido a su toxicidad para los seres humanos, los animales y las plantas (Kaya et al., 2019). Los contaminantes incluyen cianuro, disolvente, cobalto, manganeso, aluminio, magnesio, arsénico, cobre, hierro, plomo y mercurio. La utilización de zeolitas naturales se ha centrado en la eliminación de amonio y metales pesados mediante intercambio iónico. Existen diversos procesos para tratar el agua contaminada por metales pesados usando zeolitas. Algunos de ellos son coagulación (Tang et al., 2014), precipitación química (Benalia et al., 2022) y cambio iónico por supuesto (Qasem et al., 2021).

Las propiedades de intercambio iónico de las zeolitas les permiten atrapar metales indeseables y evitar que entren en los ecosistemas y la cadena alimentaria. Los estudios informan que las zeolitas pulverizadas, particularmente la clinoptilolita, reducen la transferencia de metales pesados, como el cobre, el plomo y el zinc, de los suelos a las plantas.

Tratamiento de efluentes mineros

El tratamiento de efluentes mineros mediante el uso de zeolitas es un proceso efectivo y utilizado en la industria debido a las propiedades únicas de las zeolitas para adsorber metales pesados,

y otros contaminantes presentes en los efluentes. Los efluentes mineros suelen ser muy ácidos o alcalinos, lo que puede afectar la eficacia del tratamiento con zeolitas. Por lo tanto, se ajusta el pH del efluente a un rango óptimo para maximizar la adsorción en las zeolitas. Se elige el tipo de zeolita adecuado basándose en la composición química del efluente y en los contaminantes específicos que se desea eliminar. Las zeolitas más comúnmente utilizadas incluyen clinoptilolita y mordenita debido a su capacidad para adsorber metales pesados como el plomo, cobre, zinc, cadmio, entre otros (Shaobin et al., 2010).

Absorción de amonio

La clinoptilolita remueve contaminantes de aguas residuales a través de una combinación de procesos de adsorción e intercambio iónico. La adsorción incluye el movimiento y la acumulación de sustancia, conocida como adsorbente. La tasa y la magnitud de adsorción es proporcional al área superficial del material adsorbente y es mayor con aumentos en la temperatura. El intercambio iónico, entonces, implica la adsorción de ciertos iones en forma selectiva, como el amonio, por medio de zeolitas, debido a la carga y características estructurales de ambas sustancias (Bernal et al., 1993).

Tratamiento de contaminación por mercurio mediante zeolitas

Se elige una zeolita adecuada para la adsorción de mercurio. En general, las zeolitas naturales como la clinoptilolita y las zeolitas sintéticas modificadas específicamente para este propósito son utilizadas debido a su capacidad para adsorber metales pesados, incluyendo el mercurio (Vassilis et al., 2023). Antes de aplicar las zeolitas, es importante ajustar el pH del efluente para optimizar la adsorción del mercurio. El pH óptimo puede variar según el tipo de zeolita utilizada y las características específicas del efluente. El tratamiento de contaminación por mercurio mediante zeolitas es efectivo debido a la alta capacidad de adsorción de estos materiales, su selectividad y su capacidad para ser regenerados y reutilizados. Sin embargo, es esencial realizar pruebas piloto y ajustes específicos según las características del efluente y las propiedades de las zeolitas para optimizar la eficiencia del proceso.

RESULTADOS

Los resultados observados en la producción científica indican un interés latente por parte de la comunidad científica en su literatura, lo cual es

coherente dada la necesidad de avances en el desarrollo de materiales y métodos que sirvan como técnicas de remediación ambiental, remedios ambientales en un mundo que experimenta graves problemas de contaminación. Además, se realizó un análisis bibliométrico para comprender la estructura intelectual de esta área, evaluando la producción científica, contribuciones de revistas, autores y documentos citados con frecuencia, lo que demuestra fehacientemente que las zeolitas naturales tienen un amplio campo de aplicación en temas de protección, remediación y control ambiental.

CONCLUSIÓN

Las zeolitas naturales son materiales viables para ser utilizados en diversas actividades de remediación ambiental. Diversos grupos de investigación han diseñado e implementado estrategias experimentales para estudiar y evaluar la eficacia de estos materiales para la remediación de la contaminación en algunas de sus diversas formas, como son contaminación de plantas y suelo, aguas residuales, metales pesados en medio acuoso, cuyos resultados esperan contribuir al desarrollo e implementación de estas técnicas de descontaminación alrededor del mundo. Además de estas aplicaciones, las zeolitas naturales se utilizan en el área de la agricultura. Las zeolitas son útiles en agricultura por su gran porosidad, capacidad de intercambio catiónico y selectividad para los cationes amonio y potasio. Pueden utilizarse como portadores de nutrientes y como medio para liberar nutrientes. Aunque se ha avanzado bastante en la investigación, es necesario seguir investigando para utilizarlas eficazmente en la agricultura.



REFERENCIAS

- Awad, A. M., Shaikh, S. M. R., Jalab, R., Gulied, M. H., Nasser, M. S., Benamor, A. & Adham, S. (2019). Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: a comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 228, 115719. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2019.115719>
- Benalia, M. C., Youcef, L., Bouaziz, M. G., Achour, S. & Menasra, H. (2022). Removal of heavy metals from industrial wastewater by chemical precipitation: mechanisms and sludge characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 5587-5599. <https://doi.org/10.1007/S13369-021-05525-7/FIGURES/7>
- Bernal, M. P. & Lopez-Real, J. M. (1993). Natural zeolites and sepiolite as ammonium and ammonia adsorbent materials. *Bioresource Technology*, 43, 27-33. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(93\)90078-P](https://doi.org/10.1016/0960-8524(93)90078-P)
- Bolan, N. S. & Mowatt, C. (2000). Potential Value of Zeolite in the Removal of Contaminants from Wastewater Stream. *New Zealand Water and Waste Association*.
- Cataldo, E. C., Salvi, L. S., Paoli, F. P., Fucile, M. F., Masciandro, G. M., Manzi, D. M., Masini, C. M. & Mattii, G. B. M. (2021). Application of zeolites in agriculture and other potential uses: A review. *Agronomy*, 11, 1-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081547>
- Collins, F., Rozhkovskaya, A., Outram, J. G. & Millar, G. J. (2020). A critical review of waste resources, synthesis, and applications for Zeolite LTA. *Micro-porous Mesoporous Mater*, 291, 109667. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109667>
- Darabdhara, J. & Ahmaruzzaman, M. (2022). Recent developments in MOF and MOF based composite as potential adsorbents for removal of aqueous environmental contaminants. *Chemosphere*, 304. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135261>
- De Campos Bernardi, A. C., Polidoro, J. C., De Melo Monte, M. B., Pereira, E. I., De Oliveira, C. R. & Ramesh, K. (2016). Enhancing nutrient use efficiency using zeolites minerals-a review. *Adv. Chem. Eng. Sci.*, 6(4), 295-1204. <https://doi.org/10.4236/aces.2016.64030>
- Espinosa, Y., Olmos, J. y Hernández, C. (2018). "Zeolitas naturales: Una alternativa para la remediación ambiental". 6th Engineering, Science and Technology Conference, 728-735. <https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1476>
- Franus, W. (2017). The effect of the crystallochemical properties of zeolites on asphalt foaming. 1, 62-66. <https://doi.org/10.15199/33.2017.08.18>
- Hristov, P., Yoleva, A., Djambazov, S., Chukovska, I. & Dimitrov, D. (2012). Preparation and Characterization of Porous Ceramic Membranes for Micro-Filtration from Natural Zeolite. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 47(4), 476-480. <http://dx.doi.org/10.18502/keg.v3i1.1476>
- Kaya, C., Ashraf, M., Alyemeni, M. N. & Ahmad, P. (2019). Responses of nitric oxide and hydrogen sulfide in regulating oxidative defence system in wheat plants grown under cadmium stress. *Physiologia Plantarum*, 168, 345-360. <https://doi.org/10.1111/>

- ppl.13012
- Li, Y. I., Li, L. & Yu, J. (2017). Applications of zeolites in sustainable chemistry. *Chem*, 3(6), 928-949. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.10.009>
 - Luz, A. (1994). Zeolitas: propiedades y usos industriales. Serie Tecnología Mineral (número 60), CETEM, Centro de Tecnología Mineral.
 - Mahesh, M., Thomas, J., Arun Kumar, K., S. Bhole, B., Suresh, N. V., K. Vaid, S. & Sahu, S. K. (2018). Zeolite farming: a sustainable agricultural prospective. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, 7, 2912-2924. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.705.340>
 - Manikandan, S., Subbaiya, R., Saravanan, M., Ponraj, M., Selvam, M. & Pugazhendhi, A. (2022). A critical review of advanced nanotechnology and hybrid membrane-based water recycling, reuse, and wastewater treatment processes. *Chemosphere*, 289. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132867>
 - Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P. & Jácome-Francis, K. (2021). Worldwide Research Analysis on Natural Zeolites as Environmental Remediation Materials. *Sustainability*, 13, 6378. <https://doi.org/10.3390/su13116378>
 - Nguyen, M. L. & Tanner, N. N. (1998). Ammonium removal from wastewater using natural Zealand Zeolite. *New Zealand Journal of Agriculture Research*, 41(3), 427-446. <https://doi.org/10.1080/00288233.1998.9513328>
 - Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H. & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *NPJ. Clean Water*, 4, 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
 - Simona, M. y Camelia, T. (2019). Zeolites Applications in Veterinary Medicine. In *Zeolites-New Challenges*. IntechOpen (137-144). <https://doi.org/10.5772/intechopen.87969>
 - Szerement, J., Szatanik-Kloc, A., Jarosz, R., Bajda, T. y Mierzwa-Hersztek, M. (2021). Contemporary applications of natural and synthetic zeolites from fly ash in agriculture and environmental protection. *J. Clean. Prod.*, 311, 127461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127461>
 - Tang, X., Zheng, H., Teng, H., Sun, Y., Guo, J., Xie, W., Yang, Q. & Chen, W. (2014). Chemical coagulation process for the removal of heavy metals from water: a review. *Desalination and Water Treatment*, 57. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.977959>
 - Vassilis, J., Aliya, K., Almira, G., Nurassy, K. & Zhandos, T. (2023). Efficient mercury removal from water by using modified natural zeolites and comparison to commercial adsorbents. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101017>
 - Yadav, V., Rani, M., Kumar, L., Singh, N. & Ezhilselvi, V. (2022). Effect of Surface Modification of Natural Zeolite on Ammonium Ion Removal from Water Using Batch Study: an Overview. *Water, Air & Soil Pollution*, 233, 465. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05948-4>

