

Síntesis de zeolitas como vía de suprarreciclaje de residuos de la construcción y la demolición

Gleysi Estefanía Morales Martínez ¹, Daniel Sánchez Bravo ¹, Liliana Lizárraga Mendiola ², Gabriela A. Vázquez Rodríguez ^{1,*}

¹ Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Km. 4.5 Carr. Pachuca-Tulancingo, 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

² Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

* Autora de correspondencia: gvazquez@uaeh.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 10 de abril de 2025 Aceptado: 4 de junio de 2025 Publicado: 19 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.420>

Resumen: El presente artículo explora una alternativa sustentable para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) mediante su suprarreciclaje en zeolitas sintéticas. Estos residuos, usualmente considerados inertes, pueden transformarse en materiales con alto valor agregado, gracias a sus contenidos de sílice y alúmina, precursores clave en la síntesis zeolítica. Se describen los principales métodos de obtención de zeolitas, con énfasis en la síntesis hidrotérmica, que permite cristalizar fases zeolíticas a partir de soluciones alcalinas bajo condiciones controladas de temperatura y presión. Se presentan casos de éxito reportados en la literatura en los que los RCD han sido utilizados para sintetizar analcima y otras zeolitas, capaces de adsorber metales pesados como el plomo o uranio, así como contaminantes orgánicos, entre otras aplicaciones. Esta línea de investigación se enmarca en los principios de la economía circular, al reducir la disposición en vertederos y promover la reutilización de materiales. Las zeolitas obtenidas tienen aplicaciones en catálisis, tratamiento de aguas y captura de gases, lo que refuerza su valor ambiental e industrial. Así, se propone un modelo innovador y sostenible para valorizar residuos comunes y abundantes.

Palabras clave: RCD; zeolitas; síntesis hidrotérmica; economía circular, producción de biodiésel.

Introducción

Los residuos de la construcción y la demolición (RCD) son los residuos generados principalmente en entornos urbanos como resultado de actividades relacionadas con la edificación, ya sea con la construcción de nuevas estructuras, la demolición o la rehabilitación de las existentes (Romero, 2006). A diferencia de los residuos sólidos urbanos convencionales, los RCD se componen en su mayoría de materiales inorgánicos como concreto, ladrillos, metales, azulejos, cerámica, yeso, y vidrio, aunque también pueden incluir mezclas asfálticas, madera y plásticos, entre otros. Los mayores generadores de RCD son China, Estados Unidos y la Unión Europea (Soto-Paz *et al.*, 2023). En México, se ha estimado que la vivienda social implica un consumo de materiales de construcción de 1.24 toneladas/m², de las cuales aproximadamente 0.083 toneladas/m² corresponden a RCD (Ramos-Rodríguez *et al.*, 2023).

Por su origen eminentemente pétreo, los RCD suelen considerarse inertes; sin embargo, pueden contener materiales peligrosos, tales como metales pesados, hexabromociclododecano y éteres de difenilo polibromados usados en aislantes térmicos, así como combustibles y disolventes (Papamichael *et al.*, 2023). Estos materiales generan impactos ambientales negativos en los ecosistemas, pero también pueden provocar complicaciones a la salud, como cáncer, daño hepático y renal, daño fetal, trastornos neurológicos, entre otros padecimientos (Molla *et al.*, 2021; Tafesse *et al.*, 2022).

Aunque la tasa de recuperación de RCD varía según el país, se estima que el 35% de los RCD del mundo se disponen en vertederos, a pesar de que el 75% tiene un valor añadido (Soto-Paz *et al.*, 2023). Para el caso de México, se ha calculado que el 78% de los RCD termina en vertederos, y que solo el 22% se canaliza a algún tipo de reciclaje (Ramos-Rodríguez *et al.*, 2023). Para disminuir la disposición de RCD en vertederos, la directiva 2018/850 del Parlamento Europeo estableció metas claras para reducir esta práctica de cara al año 2035, lo que evidencia la urgencia de implementar estrategias más eficaces para la gestión de los RCD, como el fomento de su reúso o reciclaje en procesos con beneficios ambientales (Papamichael *et al.*, 2023).

El reciclaje, el reúso y el suprarreciclaje (en inglés, *upcycling*) son estrategias fundamentales para la gestión sustentable de los residuos, ya que promueven la reducción del impacto ambiental y la conservación de los recursos pétreos vírgenes. El reciclaje implica la transformación de los residuos en nuevos productos, por lo general en procesos que

demandan nuevas entradas de materiales y de energía. El reúso extiende la vida útil de los residuos mediante su utilización repetida sin que sufran transformaciones significativas. Por su parte, el suprarreciclaje consiste en la revalorización creativa de residuos para producir bienes de mayor valor o calidad que el original. Estas prácticas contribuyen a la economía circular, al fomentar un modelo productivo más eficiente y menos contaminante (Boise State University, 2023).

La transformación de los RCD en zeolitas, que podría reducir la proporción de estos residuos enviada a vertederos al suprarreciclarlos en un producto valioso, se alinea con los principios de la economía circular. Por ello, el objetivo de este artículo es presentar las zeolitas como un material de interés a través de la exposición de sus aplicaciones y beneficios ambientales, así como los métodos de síntesis de zeolitas más comunes. Asimismo, se expondrán algunos ejemplos del empleo de los RCD como precursores de la síntesis, y se esbozarán tendencias futuras de esta práctica.

Desarrollo

Una zeolita es un material que tiene una estructura cristalina, compuesta por tetraedros – formas parecidas a una pirámide con cuatro caras triangulares– de silicatos y aluminio. Estos tetraedros están unidos por átomos de oxígeno, formando una red que crea cavidades interconectadas, similares a canales y jaulas (Figura 1a). Estas cavidades son lo suficientemente amplias como para permitir el paso de moléculas externas, y generalmente están ocupadas por agua y cationes extraestructurales (es decir, que se encuentran fuera de la estructura propia de la zeolita ya mencionada), los cuales suelen ser intercambiables (Gregg, 2023). Esta conformación especial le otorga propiedades muy valoradas, como la ya mencionada capacidad de intercambio iónico, actividad catalítica en varias reacciones químicas y la capacidad para adsorber otras moléculas. Por lo anterior, se les considera materiales útiles en una amplia gama de aplicaciones industriales.

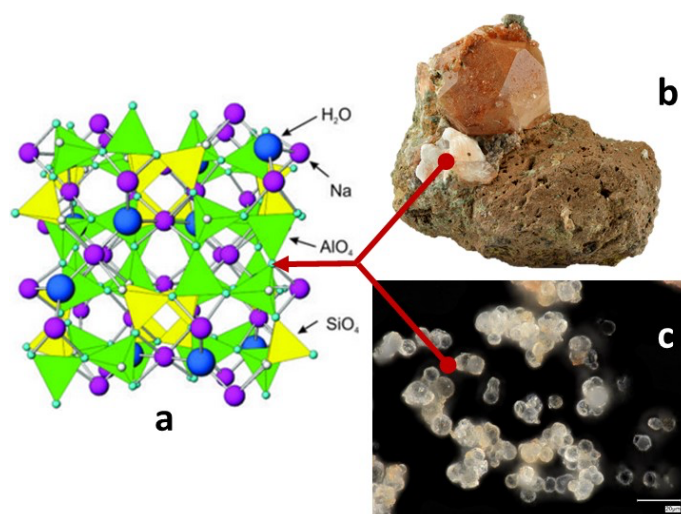


Figura 1. a) Arreglo atómico de la analcima, $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$; b) analcima natural de Semnan, Irán; analcima sintética. Créditos de las imágenes: a) Dexter Perkins, licencia CC BY-NC-SA 4.0, tomada de <https://geo.libretexts.org/>; b) Ivar Leidus, licencia CC BY-SA 4.0, tomada de <https://commons.wikimedia.org/>; c) elaboración propia.

Zeolitas naturales y sintéticas

Las zeolitas se encuentran profusamente en la naturaleza, en donde existen más de 40 tipos diferentes. Entre las más comunes se encuentran la analcima (Fig 1b), cabazita, heulandita, natrolita, phillipsita y la estilbita. Sin embargo, las zeolitas sintéticas (Figura 1c) presentan varias ventajas; debido a que son diseñadas en un laboratorio, las condiciones en las que se generan son más estables, lo que permite que adquieran porosidades uniformes, buenas capacidades de intercambio iónico, estabilidad térmica o química. A su vez, al contar con un tamaño de poros uniforme, las zeolitas sintéticas se pueden enfocar a aplicaciones definidas, como la adsorción de contaminantes, la catálisis química o el tamizado molecular (Gallo-González y Vázquez-Rodríguez, 2021).

Richard Barrer y Robert Milton fueron pioneros en la síntesis de zeolitas a finales de los años 1940. Barrer, investigador del Imperial College de Londres, basó sus primeros estudios en la transformación de fases minerales conocidas bajo la acción de soluciones de sales fuertes, como el cloruro y bromuro de bario (BaCl_2 y BaBr_2 , respectivamente) a altas temperaturas ($170 - 270^\circ\text{C}$) (Bustillos-Yaguana y Suin-Arévalo, 2014). Union Carbide Co. inició la comercialización de zeolitas sintéticas en 1954, que se usaron primero en el secado de refrigerantes y gas natural; posteriormente, se les empleó en procesos de craqueo catalítico y como intercambiadores de iones en detergentes (Vaughan, 2014). Para su formación son necesarias condiciones estrictas de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión

parcial de agua; asimismo, estos factores son determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas (Curi *et al.*, 2006).

Métodos de síntesis

Según Khaleque *et al.* (2020), existen diversas formas en las que se pueden obtener zeolitas, las cuales se presentan a continuación:

- **Método solvotérmico.** Si bien el agua es el disolvente universal y el más empleado para la síntesis de zeolitas, es posible obtener materiales zeolíticos a partir de alcoholes (tales como metanol, etanol, pentanol), etilenglicol, hidrocarburos e incluso piridina. La síntesis depende de la temperatura y la presión aplicadas, así como de factores tales como los materiales de partida, su composición, la proporción de la sílice, la alcalinidad, la agitación o la falta de ella, y el tiempo de síntesis, entre otros. Este método, a su vez, se subdivide en sus variantes hidrotermal e ionotérmica.
 - **Método hidrotermal.** Se considera la ruta primaria de la síntesis de zeolitas; utiliza agua como solvente y una base fuerte como mineralizador a diferentes temperaturas y presiones. Requiere de un recipiente sellado y una autoclave que permita la transferencia homogénea de calor (Figura 2); por ello, es de los métodos más empleados, al ser muy sencillo y económico en comparación con otros.
 - **Método ionotérmico.** Requiere líquidos iónicos (sales en estado líquido a bajas temperaturas), los cuales actúan tanto como disolvente y como “plantilla” o agente que dirige la formación de sólidos hacia una estructura potencial. Esta técnica se considera sostenible porque los líquidos iónicos pueden reutilizarse y tienen una baja presión de vapor, lo que reduce riesgos ambientales y de seguridad.
- **Método de fusión alcalina y de lixiviación alcalina.** Por un lado, el método de fusión alcalina busca descomponer el material rico en sílice o alúmina en presencia de un álcali (una base disuelta en agua) que actúa como activador para la formación de sales solubles de aluminato y silicato. Por otro lado, en la lixiviación alcalina se extraen componentes solubles (como el silicio y el aluminio) de un material sólido utilizando una solución básica, generalmente hidróxido de sodio (NaOH).
- **Método sol-gel.** Este proceso implica la formación de una sustancia coloidal inorgánica y la gelificación de la suspensión, que a su vez forma una estructura de red tridimensional. Este proceso abarca la transición de un sistema de solución de un “sol” líquido a una fase de “gel” sólida, lo que permite un mejor control de la técnica; es decir, proporciona una mayor porosidad y un tamaño de partícula definido.
- **Síntesis con microondas.** La materia prima se introduce en un microondas, en donde las mismas ondas actúan como campos eléctricos de alta frecuencia que eventualmente producen calor para llevar a cabo la reacción. Esta síntesis suele trabajarse en combinación con otros métodos, como el hidrotermal, el solvotermal o el ionotérmico.
- **Método de energía ultrasónica.** Consiste en la aplicación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia, como lo indica su nombre, a una mezcla de reacción, para producir un fenómeno conocido como cavitación. Este se refiere a la formación de una cámara de gas o vapor (una clase de microburbujas) en un líquido, que al colapsar de forma violenta logra reducir la presión a una temperatura constante del líquido (Mao *et al.*, 2019). Esto mejora la disolución, dispersión y reactividad de los materiales.

Los residuos de la construcción y la demolición como precursores de zeolitas

El uso de las zeolitas producidas a partir de RCD es un campo relativamente nuevo. Por ejemplo, se ha reportado la síntesis de zeolitas a partir de agregados de concreto aireado esterilizados en autoclave (Hartmann *et al.*, 2012). En este trabajo, se encontraron y analizaron diferentes rutas de síntesis, las cuales involucraban tratamientos alcalinos y ácidos de los residuos antes de su cristalización final mediante adición de aluminato de sodio. Más recientemente, se han explorado las múltiples aplicaciones de las zeolitas obtenidas en la descontaminación ambiental. Así, científicos de la Universidad del Sur de China trabajaron con zeolitas magnéticas derivadas de residuos de ladrillos sin cocer, y encontraron que las zeolitas podían eliminar iones de uranio (Ai *et al.*, 2022). En Japón, se sintetizó analcima a partir

de polvo de concreto calizo residual, previamente tratado con HCl para eliminar compuestos de calcio. La formación del mineral se corroboró por medio de difracción de rayos X, y el producto obtenido se empleó más tarde en ensayos de adsorción de azul de metileno (Kanda y Harada, 2021). En el 2024 se utilizó una analcima, producida a través de una síntesis hidrotermal a partir de desechos de ladrillos, para adsorber iones contaminantes, específicamente Pb^{2+} (Zhou *et al.*, 2024). Un resumen de estos y otros ejemplos de obtención de zeolitas tomando RCD como materiales precursores se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de ejemplos de obtención de zeolitas a partir de residuos de la construcción y la demolición.

Residuo	Método de síntesis	Zeolita producida	Aplicación	Referencia
Suelo excavado en actividades de construcción	Hidrotermal con una mezcla de suelo, Na_2SiO_3 y NaOH	Zeolita GIS	Remediación de suelos contaminados con cadmio mediante intercambio catiónico	Cai <i>et al.</i> (2025)
Residuos de vidrio y chatarra de aluminio	Hidrotermal con aluminato de sodio	Zeolita tipo faujasita y Na-P1	Reducción catalítica selectiva de NO a NH_3	Sayehi <i>et al.</i> (2022)
Agregados de concreto aireado	Hidrotermal con un tratamiento de lixiviación ácida con ácido cítrico	Zeolita A o LTA	Capacidad de adsorción de agua y estabilidad hidrotermal	Hartmann <i>et al.</i> (2012)
Residuos de ladrillos sin cocer	Hidrotermal combinada con una fusión a alta temperatura con nanopartículas magnéticas (Fe_3O_4) y una funcionalización con grupos sulfhidrilo (-SH)	Zeolita magnética funcionalizada con grupos sulfhidrilo	Adsorción eficiente de iones de uranio (VI) en aguas residuales nucleares	Ai <i>et al.</i> (2022)
Polvo de concreto calizo residual	Tratamiento con HCl del polvo de concreto seguido de síntesis hidrotermal	Analcima	Adsorción (medida mediante una prueba con azul de metileno)	Kanda y Harada (2021)
Residuos de ladrillos	Hidrotermal con postratamiento de HCl	Analcima	Adsorción de iones de plomo (Pb^{2+}) en aguas residuales simuladas	Zhou <i>et al.</i> (2024)

En los estudios mencionados arriba se utilizó el mismo método de síntesis; es decir, se empleó la síntesis hidrotermal, que disuelve mejor los componentes del sistema reaccionante, y así permite la reacción de sustancias que en condiciones normales son muy insolubles (Zanella, 2012). El método de síntesis hidrotermal a partir de estos residuos implica tres etapas (Czarna-Juszkiewicz *et al.*, 2020), que se representan en la Figura 2. Primero, se dispersa el material de partida (rico en sílice, SiO_2 , y alúmina, Al_2O_3) en una solución alcalina fuerte que provea cationes, típicamente NaOH, y se le somete a un tratamiento térmico a temperaturas entre 100 y 200 °C durante 6 a 24 horas. En la segunda fase, gracias a la temperatura, la fase amorfa inicial se transforma gradualmente en una fase cristalina. Finalmente, ya que el material amorfo se trasformó en cristales, estos pueden separarse, enjuagarse y secarse.

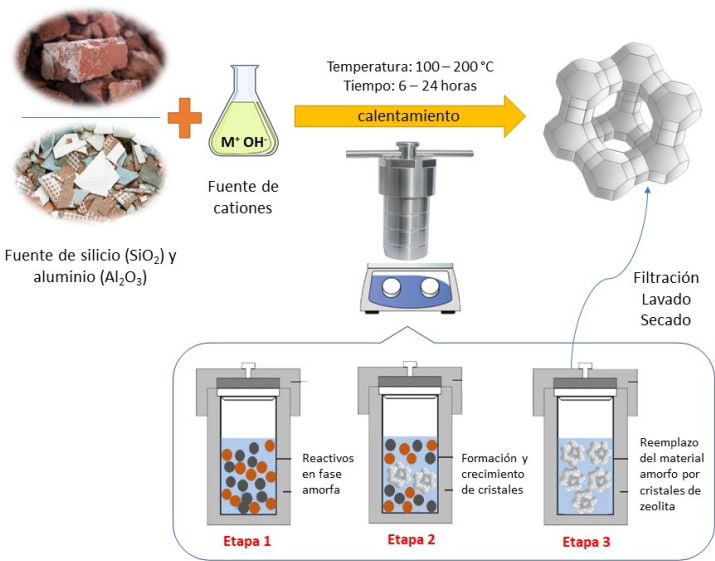


Figura 2. Síntesis de zeolitas a partir de residuos de la construcción y la demolición mediante el método hidrotermal. Elaboración propia a partir de Czarna-Juszkiewicz *et al.* (2020).

Las ventajas de este método incluyen su bajo consumo energético, la posibilidad de utilizar residuos industriales muy comunes, como los RCD, las cenizas volantes o las latas de aluminio (Guerrero-Marín *et al.*, 2024). A pesar de que se trata de una tecnología relativamente simple para obtener zeolitas, su proceso de producción no se ha optimizado, ya que el mecanismo de síntesis de las zeolitas no se conoce en su totalidad. La pureza de las zeolitas obtenidas depende de la concentración de álcalis, la temperatura, la relación sólido/líquido y la relación Si/Al (Czarna-Juszkiewicz *et al.*, 2020).

Ventajas de la producción de las zeolitas

Como se mencionó con anterioridad, los residuos de construcción y demolición (RCD) pueden gestionarse desde una perspectiva de economía circular, un modelo innovador de producción y consumo que busca compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes tantas veces como sea posible. De este modo, se reduce al mínimo los residuos que terminan en vertederos y se añade un valor adicional a los materiales (Parlamento Europeo, 2023). A diferencia del modelo lineal tradicional (basado en extraer, fabricar, usar y desechar) la economía circular propone cerrar el ciclo de los materiales, promoviendo la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos generados en el sector de la construcción. Si, como proponemos, los RCD se utilizan para sintetizar zeolitas, que son productos de alto valor agregado, se trata de suprarreciclaje, también previsto en esquemas de economía circular.

Las zeolitas tienen diversas aplicaciones, tales como en el campo de la catálisis heterogénea, en donde destacan por su porosidad, acidez ajustable y estabilidad térmica. Por ejemplo, las zeolitas representan una alternativa prometedora para la producción de biodiésel por transesterificación y esterificación de diversas materias primas, incluso de aceites de baja calidad con alto contenido de ácidos grasos libres (Yang y Yu, 2023). Por otra parte, además de su conocida capacidad de adsorción de metales pesados y diversos contaminantes orgánicos, que subraya el interés por incorporarlas a sistemas de potabilización del agua y a tratamientos de efluentes y aguas de escorrentía urbanas (Corona-Lugo y Vázquez-Rodríguez, 2024), las zeolitas pueden absorber compuestos orgánicos volátiles, gases de efecto invernadero, como el CO₂, e incluso almacenar eficientemente H₂ (Czarna-Juszkiewicz *et al.*, 2020). Otra propiedad importante es su elevada capacidad de intercambio catiónico, debida a que los cationes extraestructurales de las zeolitas pueden intercambiarse con otros de forma controlada, lo cual tiene numerosas aplicaciones en materia agrícola.

Tendencias en la síntesis de zeolitas

Yan *et al.* (2024) han perfilado tendencias clave que, consideran, transformarán la manera en que se sintetizan las zeolitas. En primer lugar, enfatizan la obtención de nuevos materiales zeolíticos mediante métodos innovadores, tales como la condensación topotáctica de cadenas silicatadas, que permite obtener estructuras con poros extragrandes y altamente interconectados. Asimismo, han destacado técnicas avanzadas de caracterización a nivel atómico, que facilitarán la comprensión de los mecanismos de cristalización y catálisis. Paralelamente, han destacado los aportes que vendrán de la mano de la inteligencia artificial, que promete optimizar los procesos de síntesis al descubrir patrones ocultos entre estructura, funcionalidad y condiciones experimentales. Finalmente, estos autores se han referido a las aplicaciones emergentes de las zeolitas, como la conversión de gases de efecto invernadero y la cosecha de agua atmosférica, que consolidarán su rol en la consecución de los objetivos del desarrollo sustentable.

Conclusiones

El aumento desmesurado de los residuos de la construcción y demolición es un desafío ambiental significativo. Sin embargo, en la búsqueda para evitar su disposición final en vertederos, pueden suprarreciclarse en recursos con un valor agregado. La producción de zeolitas a partir de RCD es una alternativa innovadora, que no únicamente permite la valorización de este tipo de residuos, sino que también permite su aplicación a diversas áreas, como industriales y ambientales. Estos materiales zeolíticos obtenidos de materiales que se consideran erróneamente inertes, no solo reducen el volumen de desechos, sino que se les confieren propiedades excepcionales como capacidad de adsorción, intercambio iónico y acción catalítica.

Al adoptar este tipo de acciones se busca que la sostenibilidad y la innovación trabajen en conjunto para producir modelos más amigables con el medio ambiente. Iniciativas como ésta contribuyen a mitigar el impacto ambiental de

los RCD, además de fomentar la promoción de una cultura de aprovechamiento eficiente de los recursos, alineada con los objetivos globales del desarrollo sustentable y la economía circular.

Bibliografía

- Ai, Y., Yin, N., Ouyang, Y., Xu, Y., & Yang, P. (2022). Waste non-burn-free brick derived sulfhydryl functioned magnetic zeolites and their efficient removal of uranium (VI) ions. *Applied Surface Science*, 571, 151241. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151241>.
- Boise State University (2023). Reusing, Recycling, and Upcycling: A Primer. <https://www.boisestate.edu/cobe/blog/2023/10/reusing-recycling-and-upcycling-a-primer/>.
- Bustillos-Yaguana, A. E., & Suin-Arévalo, M. A. (2014). *Diseño y Construcción de un Reactor Químico para la Obtención de Zeolitas Sintéticas*. Universidad de Cuenca.
- Cai, L., Zheng, Q., Wang, Z., Tian, Z., Yang, D., Wei, Z., & Hou, J. (2025). Converting Building Waste Soil into GIS Zeolite to Remediate Cd-Polluted Soil. SSRN, <https://doi.org/10.2139/ssrn.5218194>.
- Corona-Lugo, S. V., & Vázquez-Rodríguez, G. A. (2024). Urban Runoff Treatment by Natural and Magnetite-Modified Zeolites in Packed-Bed Columns. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00326-z>.
- Curi, A., Granda, W. J. V., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las zeolitas y su aplicación en la descontaminación de efluentes mineros. *Información Tecnológica*, 17(6). <https://doi.org/10.4067/s0718-07642006000600017>.
- Czarna-Juszkiewicz, D., Cader, J., & Wdowin, M. (2020). From coal ashes to solid sorbents for hydrogen storage. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122355>.
- Gallo-González, A. K., & Vázquez-Rodríguez, G. A. (2021). Uso de zeolitas para el control de fuentes no puntuales de contaminación del agua: revisión. *Ingeniería del Agua*, 25(4), 241-255. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15897>.
- Gregg, L. (2023). *Zeolite Group. A group of related mineral species*. Hudson Institute of Mineralogy, Mindat.org. <https://www.mindat.org/min-4395.html>.
- Guerrero-Marín, S., Legorreta-García, F., Betanzos-Cabrera, G., Atitlán-Gil, A., Juárez-Tapia, J. C., & Rosario-Olguín, Y. (2024). Síntesis de zeolita clinoptilolita a partir de silicoaluminato natural y latas de aluminio. *South Florida Journal of Development*, 5(11), e4699. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n11-046>.
- Hartmann, A., Buhl, J., & Lutz, W. (2012). Synthesis and Properties of Zeolites from Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Waste. *Zeitschrift Für Anorganische Und Allgemeine Chemie*, 638(9), 1297-1306. <https://doi.org/10.1002/zaac.201200175>.
- Kanda, Y., & Harada, S. (2021). Synthesis of zeolites from calcareous waste concrete powder. *Results In Materials*, 13, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100250>.
- Khaleque, A., Alam, M. M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. B., Xu, B., Johir, M., Karmakar, A. K., Zhou, J., Ahmed, M. B., & Moni, M. A. (2020). Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review. *Environmental Advances*, 2, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100019>.
- Mao, Y., Xia, W., Peng, Y., & Xie, G. (2019). Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. *Fuel Processing Technology*, 195, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106150>.
- Molla, A. S., Tang, P., Sher, W., & Bekele, D. N. (2021). Chemicals of concern in construction and demolition waste fine residues: A systematic literature review. *Journal of Environmental Management*, 299, 113654. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113654>.
- Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2023). Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management & Research*, 41(12), 1728-1740. <https://doi.org/10.1177/0734242x231190804>.
- Parlamento Europeo (2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. Temas | Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>.
- Ramos-Rodríguez, G. G., Sandoval-García, E., & Correa Torres, A. (2023, 14 marzo). Midiendo la economía circular en México. *INEGI-Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*. <https://rde.inegi.org.mx/index.php/2023/01/04/midiendo-la-economia-circular-en-mexico/>.
- Romero, E. (2006). Residuos de Construcción y Demolición. *Universidad de Huelva*.
- Sayehi, M., Delahay, G., Tounsi, H. (2022). Synthesis and characterization of ecofriendly materials zeolite from waste glass and aluminum scraps using the hydrothermal technique. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108561. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108561>.
- Soto-Paz, J., Arroyo, O., Torres-Guevara, L. E., Parra-Orobio, B. A., & Casallas-Ojeda, M. (2023). The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. *Journal of Building Engineering*, 78, 107724. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107724>.
- Tafesse, S., Girma, Y. E., & Dessalegn, E. (2022). Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices. *Heliyon*, 8(3), e09169. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09169>.
- Vaughan, O. (2014). Porous by design. *Nature*, 511(7509), 19-19. <https://doi.org/10.1038/nature13371>.
- Yan, W., Li, Y., Xiao, F. S., Liu, Z., & Yu, J. (2024). The Future of Zeolites. *Chemistry of Materials*, 36(15), 7103-7105. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c01675>.
- Yang, G., & Yu, J. (2023). Advancements in basic zeolites for biodiesel production via transesterification. *Chemistry*, 5(1), 438-451. <https://doi.org/10.3390/chemistry5010032>.
- Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 5(1). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2012.1.45167>.
- Zhou, J., Zhang, S., Shi, H., Qiang, J., Dong, H., & Liu, H. (2024). Hydrothermal Synthesis of Analcime from Construction Waste Bricks and Its Adsorption Mechanism for Pb²⁺. *Water, Air and Soil Pollution*, 235(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06995-9>.