

Aerogel nanoestructurado a base de sílice: aplicaciones en aislamiento térmico

Luis Alejandro García-López, Rogelio Núñez-Batres y Angel Daniel Ramírez-Herrera *

Ingeniería en Nanotecnología, Universidad de La Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo, Sahuayo de Morelos, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: 130357@ucemich.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 7 de junio de 2025 Aceptado: 12 de julio de 2025 Publicado: 24 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.483>

Resumen: Ante la creciente demanda de recursos y energía en la actualidad, se buscan materiales que tengan las mismas propiedades que los convencionales o, incluso, mejores con menos recursos. Es de vital importancia encontrar materiales sostenibles que sean capaces de aminorar los daños ambientales de origen antrópico. Por tanto, en el presente trabajo se describe el potencial de los aerogeles a base de sílice, con el propósito de ser aplicado en el sector de la construcción como aislante térmico. El aerogel de sílice (AS) debido a su estructura nanoporosa reduce considerablemente la transmisión de calor, lo que puede ayudar a disminuir el uso de calefacción o refrigeración, minimizando la utilización de recursos. En comparación a materiales convencionales que tienen limitantes y, que, si no son tratados adecuadamente generan residuos contaminantes. La implementación de AS a materiales como el hormigón, recubrimientos como yeso o, incluso, ventanas reducen significativamente la entrada de temperatura. El AS promete mucho en el futuro como nanomaterial sustentable. Por el momento es utilizado en aplicaciones específicas, por tanto, aún se encuentra en desarrollo con costos de producción elevados. No obstante, se busca la producción de cantidades industriales para aumentar su accesibilidad a construcciones convencionales.

Palabras clave: nanomateriales; materiales ultraligeros; método sol-gel; superaislantes; estructura nanoporosa.

Introducción

Actualmente existen objetivos ambientales globales, en búsqueda de la sostenibilidad en torno a la energía asequible sin ser contaminante, la acción por el clima, así como la búsqueda de ciudades y comunidades sostenibles (Naciones Unidas, 2015). Uno de los sectores clave para el cumplimiento de dichos objetivos es el sector de la construcción, a causa de que se posiciona como uno de los mayores contribuyentes a la crisis climática actual (Elhegazy *et al.*, 2024). No solo eso, sino que los edificios son responsables de consumir hasta un 40 % de la energía total en numerosos países desarrollados, que contribuye al 40 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero, uno de los principales contaminantes en la actualidad (Berardi, 2019). Este alto consumo energético se debe principalmente a la demanda de calefacción, refrigeración y climatización, que conlleva a la necesidad de mejorar los estándares de aislamiento térmico en las construcciones. Los materiales convencionales usados para el aislamiento térmico como el poliestireno expandido, la lana de vidrio y espumas de poliuretano, son rentables. Sin embargo, poseen desventajas significativas como: baja eficiencia térmica, inflamabilidad y, en algunos casos, la emisión de gases contaminantes o residuos dañinos para la salud (Koebel *et al.*, 2012). Asimismo, son compuestos con persistencia prolongada en el ambiente, a causa de la mala gestión de sus desechos.

Frente a las limitantes de los materiales aislantes convencionales el aerogel de sílice (AS), emerge como una alternativa sostenible debido a sus propiedades, superando las limitaciones de los aislantes convencionales. El AS es un material nanoporoso menos denso que el aire y posee la conductividad térmica más baja del mercado, gracias a su estructura de pequeños poros en forma de tejido. Su potencial es tal que, en las últimas décadas investigaciones, así como el sector industrial han explorado aplicaciones de aerogeles nanoestructurados que aíslan las edificaciones mediante recubrimientos, morteros adicionados, ventanas y paneles (Berardi, 2019). Incluso, en octubre de 2021, la revista científica *Science* posicionó al AS como “un material milagroso” que podría cambiar el mundo (Lu *et al.*, 2024). Los AS funcionan como redes que gracias a su tamaño (unos cuantos nanómetros) anulan la transferencia de calor, brindando un ambiente cómodo que no necesita de aparatos eléctricos o sistemas de combustión para regular la temperatura del interior del inmueble, sea utilizado en muros o ventanas, debido a que tampoco permite el paso de luz, pues la dispersa (Wang *et al.*, 2020).

Con base en lo antes mencionado y considerando la revolución tecnológica que implican los materiales como el AS en aras de la sostenibilidad. El presente artículo tiene la finalidad de mostrar un panorama general de las investigaciones en torno al AS, como aislante térmico implementado en el sector de la construcción.

Desarrollo

Una de las grandes innovaciones en materiales avanzados del siglo XXI, son los AS, que destacan por su estructura nanoporosa ultraligera. Los AS están constituidos por partículas ultrafinas en un patrón de “collar de perlas” tridimensional con orificios intersticiales llenos de aire, que típicamente representan entre el 85 % y el 99.8 % del volumen total del aerogel (Goryunova & Gahramanli, 2024). El AS a causa de su aspecto físico, consistencia y composición mayoritaria de aire es conocido también como “humo sólido”. La red de sílice que compone los AS tiene un amplio rango de poros que abarca desde 1 a 100 nm (Figura 1), los cuales se clasifican por su tamaño en: microporos que oscilan en dimensiones de 1 hasta 20 nm, mesoporos de 20 a 40 nm y los macroporos de 40 a 100 nm (Saboktakin & Saboktakin, 2015).

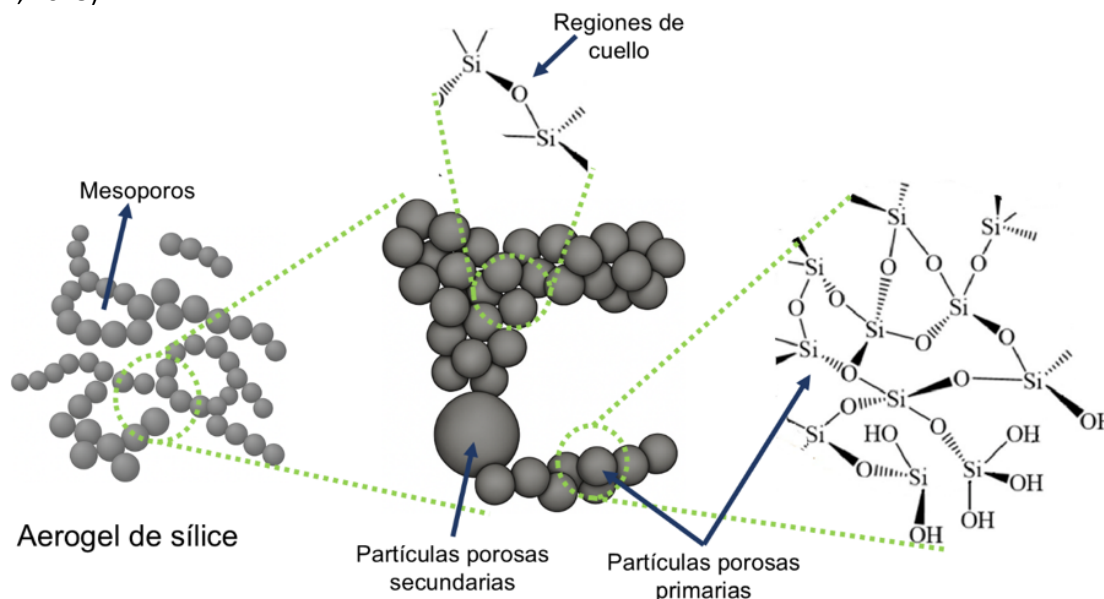


Figura 1. Microestructura de los AS (basada en Li *et al.*, 2021).

La estructura del AS se obtiene mediante el proceso de síntesis conocido como "sol-gel" (Figura 2). Este método parte de una solución, en la cual, se agregan compuestos puros de precursores, que reaccionan rompiendo enlaces entre sí y generando nuevos. Los nuevos compuestos se agregan en partículas dispersas en la solución, que posteriormente comienzan a agregarse con otras. A medida que la reacción avanza la mezcla toma una textura viscosa, como un gel. Los compuestos que no reaccionaron son eliminados mediante solventes, consecutivamente se realiza un proceso de envejecimiento al gel, para ser finalmente sometido a un proceso de secado especial y obtener el aerogel (Saboktakin & Saboktakin, 2015).

La hidrólisis es la primera fase del proceso de síntesis sol-gel, se utilizan precursores orgánicos que contienen generalmente alcóxidos de silicio como el tetraetoxisilano o tetrametoxisilano, que son agregados a un medio líquido compuesto por un solvente que puede ser etanol o metanol y agua (Rashid *et al.*, 2023). Las reacciones son catalizadas modificando el pH del medio, a ácido o base, que facilita el rompimiento de enlaces, lo que facilita la generación de grupos silanol, que se dispersan y condensan formando grupos de nanopartículas de sílice (Niculescu *et al.*, 2024). En la fase de hidrólisis se puede ajustar el rango predominante de los tamaños de poro en el material final. Por ejemplo, si se utilizan condiciones de catálisis ácida, los microporos se vuelven predominantes, mientras que, si predomina el medio básico, como en el caso de la adición de precursores de sílice modificados con grupos básicos (como aminas), se favorece la formación de macroporos (Goryunova & Gahramanli, 2024). A medida que avanza la condensación las nanopartículas se entrelazan hasta tomar una consistencia semisólida parecida a un gel (gelación), así se fortalece la estructura, el gel se somete a un envejecimiento controlado donde los grupos silanol residuales generan nuevos enlaces potenciando la resistencia mecánica, compactándose ligeramente la red sin colapsar los poros (Hasan *et al.*, 2017). El paso más importante es el secado supercrítico, el gel se coloca en el equipo de autoclave (reactor de alta presión diseñado para el secado) y se expone a un enjuague CO₂ líquido a una temperatura controlada, así como altos niveles de presión (Cuze *et al.*, 2014). Este proceso elimina el solvente sin generar una sobrecarga que pueda romper la estructura porosa. Finalmente, según sea el caso, se genera un proceso de sililación mediante agentes como el

trimetilclorosilano para reemplazar los grupos silanol de la superficie con grupos hidrofóbicos, para darle propiedades hidrofóbicas al aerogel obtenido (Saboktakin & Saboktakin, 2015).

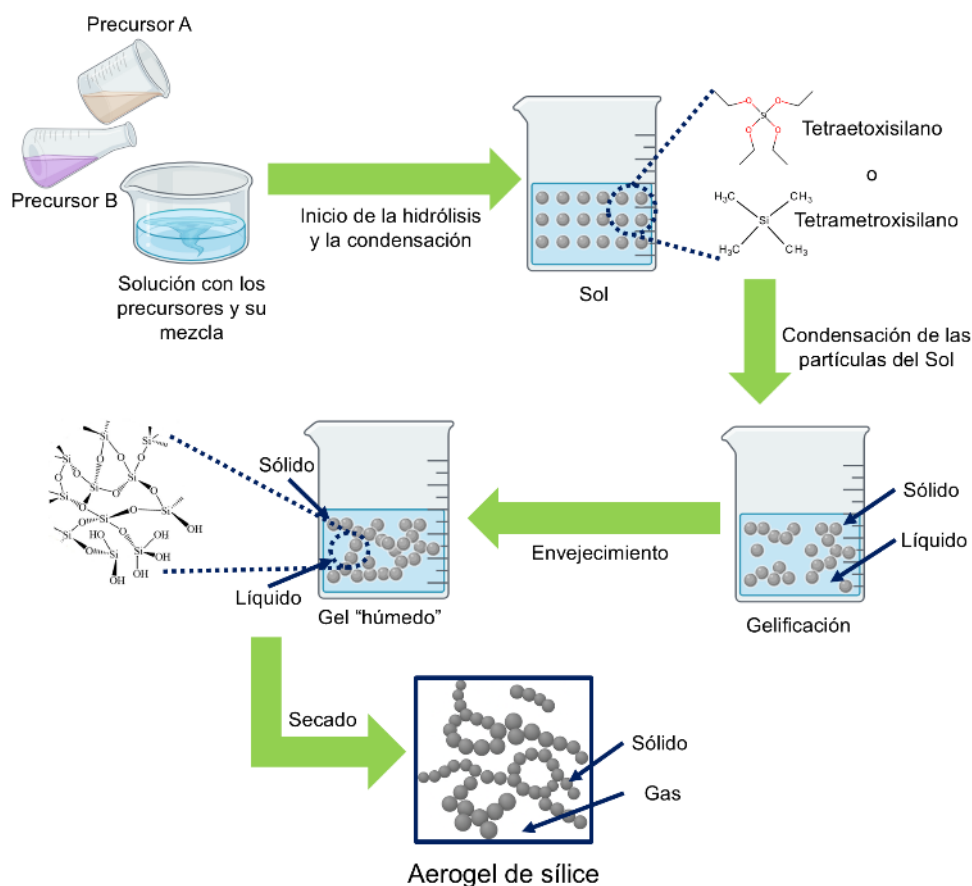


Figura 2. Esquema general para la preparación del aerogel mediante el procesamiento sol-gel (basada en Berardi, 2019).

Una de las principales ventajas de los AS es que no solo se emplean en forma monolítica (bloques sólidos), sino también como granulados o polvo. Lo anterior, facilita su integración en diferentes tipos de aislamientos y estructuras, además de reducir costos de fabricación y manipulación (Niculescu *et al.*, 2024). Asimismo, la nanoestructura de los AS les otorga propiedades que los diferencian de otros materiales aislantes. Presentan una densidad ultrabaja, como se mencionó anteriormente, que ronda entre 0.003 a 0.15 kg/m³, lo que los sitúa entre los sólidos más ligeros conocidos con una transferencia térmica excepcionalmente reducida de 0.012 hasta 0.02 W/m K, que los convierte en superaislantes (Li *et al.*, 2021). El AS es capaz de reducir significativamente dos tipos de transferencia de calor (Figura 3): a) por convección, este tipo de transferencia de calor es eliminado con tamaños microporo inferiores a 20 nm, ya que los fonones (vibraciones térmicas en la red de sílice) se dispersan a través de estos; y b) por radiación, los AS tienen la capacidad de ser dopados con opacificadores (como TiO₂) que absorben selectivamente radiación sin comprometer su aislamiento térmico (Wang *et al.*, 2020). Además, gracias a su composición principal de poros, que representan hasta un 99.8 % de la composición total, les permite una alta transmitancia lumínica de más del 90 % (que puede aumentar con agentes dopantes), una resistencia térmica de hasta 1200 °C, así como gran área superficial que oscila entre los 600 a 1000 m²/g, que les permite actuar como filtros eficientes para contaminantes como el dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles e, incluso, metales pesados (Liu *et al.*, 2016).

A causa de las múltiples propiedades de los AS se ha generado gran interés para su aplicación en el sector de la construcción, puesto que podría permitir reducir el espesor de las capas aislantes sin sacrificar el rendimiento térmico, permitiendo mayor espacio útil y ahorro energético (Koebel *et al.*, 2012). Se ha observado que el uso de aerogeles en materiales utilizados en la construcción puede modificar significativamente las propiedades térmicas de morteros, pero, disminuye la resistencia mecánica de dichos materiales específicamente la fuerza de compresión (Fickler *et al.*, 2015; Jang *et al.*, 2021). Un caso particular es el hormigón modificado con AS. Ng *et al.*, (2015) reportaron que al incorporar un 20 % en volumen de aerogel al hormigón, este presenta una reducción en la resistencia a la compresión

de 120 a 70 MPa. En cambio, con contenidos del 50 % de AS, la conductividad térmica disminuye considerablemente (0.55 W/m K) al igual que la resistencia a la compresión (20 MPa), pero presenta las características idóneas para ser aplicado en muros periféricos. Lo anterior, demuestran el potencial transformador que puede tener los AS en la construcción, a la vez que señala los desafíos a resolver.

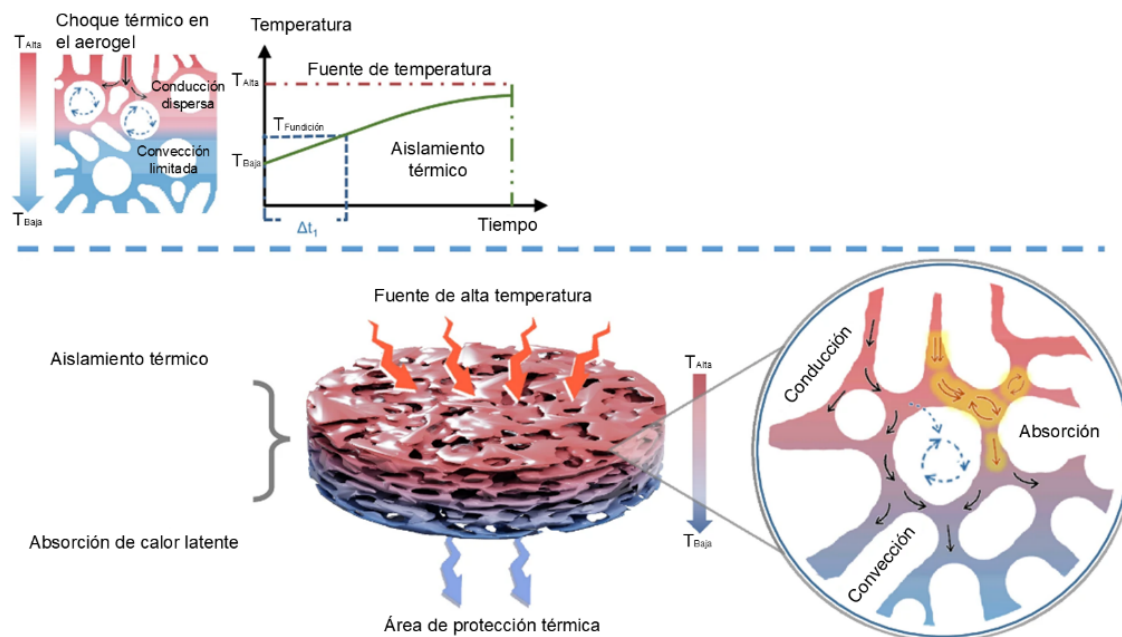


Figura 3. Respuesta térmica de aerogeles y su capacidad de aislar los choques térmicos, impidiendo efectivamente la transferencia de calor en estado estable y manteniendo diferenciales de temperatura significativos (modificado y traducido de Xiong *et al.*, 2024).

En cuanto otras aplicaciones en el sector de la construcción, se encuentra la adición de AS en yesos. Los yesos implementados con AS presentan mejoras en el proceso de instalación, a causa de que facilita la creación de capas continuas de aislamiento térmico que permite mayor capacidad envolvente en un edificio (Buratti *et al.*, 2014). Por ejemplo, Berardi & Nosrati (2018) mostraron que la adición del AS al yeso reduce la conductividad térmica del material al igual que disminuye la densidad de este. Asimismo, encontraron un punto de equilibrio entre la adición del AS al yeso, el cual es a 70 % de volumen de AS donde el material mantiene buenas propiedades aislantes (0.032 W/m K) y baja densidad (230 kg/m³). Sin embargo, si bien, a mayor proporción aumenta el aislamiento térmico las propiedades mecánicas disminuyen considerablemente. Además, debido a la naturaleza del AS los yesos modificados adquieren propiedades hidrofóbicas, evitando la absorción de agua, pero permitiendo la transpiración del vapor de agua, a diferencia de los yesos convencionales (Berardi, 2019).



Figura 4. Acristalamientos superaislantes basados en el uso de placas de AS de AIRGLASS AB (Koebel *et al.*, 2012).

Otra aplicación novedosa que aprovecha al máximo la capacidad de aislante térmico del AS, no son exclusivos de materiales de construcción sino de otros elementos del mismo sector, como en el caso de cristales en ventanas. Para lo cual se encapsulan monolitos de AS entre dos paneles de vidrio, lo que reduce el consumo de energía en calefacción hasta un 50 % en climas fríos e incluso aumentar el aislamiento acústico como menciona Wang *et al.* (2020). A mayor espesor del AS, mayor aislamiento térmico, pero se reduce considerablemente el paso de luz, por ejemplo, con un monolito de 15 mm de grosor la cantidad de luz puede disminuir entre un 50 a un 76 %, dependiendo del AS utilizado. Desafortunadamente, el procesamiento de fabricación de este tipo de ventanas que implementa alta tecnología es bastante complejo y es posible que puedan presentarse defectos propios de la fabricación como la debilidad mecánica, aunado a los costos que conlleva (Koebel *et al.*, 2012).

Pese a las múltiples ventajas que podría tener la implementación de AS la mayor limitante existente son en la actualidad los costos de producción. Por lo que solo se han considerado para aplicaciones sumamente específicas, debido a los altos costos de producción y su limitada producción a escala de laboratorio (Niculescu *et al.*, 2024). Si bien hay casos de productos que contienen AS y son comercializados en la actualidad, como el caso del yeso mejorado desarrollado en el Instituto Federal Suizo EMPA con nombre comercial de FIXIT 222, desde 2013 (Berardi, 2019). No todos los productos con base de AS tienen la misma suerte. Por lo que se requiere mayor investigación en torno a los procesos de obtención para ser posible la obtención industrial a costos más asequibles a la población.

Conclusiones

Las estructuras de los AS son un material que se propone como sostenible, debido a que es capaz de aislar temperaturas, incluso en climas extremos, permitiendo grandes ahorros energéticos en comparación a los materiales convencionales existentes en el mercado. Lo que es relevante en la reducción del impacto ambiental que generan las edificaciones, y más aún las grandes ciudades. Existen reportes de la utilización de AS, con resultados bastante alentadores que muestran la gran aplicabilidad que podrían tener en el día a día, pero aún hay deficiencias con gran capacidad de ser mejoradas para que sea un producto escalable. Como es el caso de su método de obtención, debido a que las condiciones de obtención son bastante específicas y complejas, ocasionando una producción limitada a escala industrial por los altos costo. Sin embargo, una vez que su producción sea rentable al igual que asequible para el público en general, los beneficios no serían únicamente en el sector constructivo sino se amplificaría a otros sectores como el aeroespacial, automotriz, entre muchos otros.

Bibliografía

- Berardi, U. & Nosrati, R. (2018). Long-term performances of aerogel-enhanced insulating materials. *Energy*, 147, 1188-1202. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.053>
- Berardi, U. (2019). Aerogel-enhanced insulation for building applications. In *Nanotechnology in Eco-efficient Construction* (pp. 395–416). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00017-7>
- Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E. & Agosti, F. (2014). Development of innovative aerogel based plasters: preliminary thermal acoustic performance evaluation. *Sustainability*, 6(9), 5839-5852. <https://doi.org/10.3390/su6095839>
- Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J. & Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
- Elhegazy, H., Zhang, J., Amoudi, O., Zaki, J. N., Yahia, M., Eid, M. & Mahdi, I. (2024). An Exploratory Study on the Impact of the Construction Industry on Climate Change. *Journal of Industrial Integration and Management*, 9(3), 397-418. <https://doi.org/10.1142/S2424862222500282>
- Fickler, S., Milow, B., Ratke, L., Schnellenbach-Held, M. & Welsch, T. (2015). Development of high performance aerogel concrete. *Energy Procedia*, 78, 406-411. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.684>
- Goryunova, K. I. & Gahramanli, Y. N. (2024). Insulating materials based on silica aerogel composites: synthesis, properties and application. *RSC Advances*, 14(47), 34690–34707. <https://doi.org/10.1039/D4RA04976D>
- Hasan, M. A., Sangashetty, R., Esther, A. C. M., Patil, S. B., Sherikar, B. N. & Dey, A. (2017). Prospect of Thermal Insulation by Silica Aerogel: A Brief Review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 98, 297–304. <https://doi.org/10.1007/s40033-017-0136-1>
- Jang, D., Yoon, H.N., Seo, J., Lee, H.K. & Kim G.M. (2021). Effects of silica aerogel inclusion on the stability of heat generation and heat-dependent electrical characteristics of cementitious composites with CNT. *Cement and Concrete Composites*, 115, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103861>
- Koebel, M., Rigacci, A. & Achard, P. (2012). Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 63, 315–339. <https://doi.org/10.1007/s10971-012-2792-9>
- Li, C., Chen, Z., Dong, W., Lin, L., Zhu, X., Liu, Q., Zhang, Y., Zhai, N., Zhou, Z., Wang, Y., Chen, B., Ji, Y., Chen, X., Xu, X., Yang, Y. & Zhang, H. (2021). A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 553, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120517>
- Liu, Z. h., Ding, Y. d., Wang, F. & Deng, Z. p. (2016). Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel. *Construction and Building Materials*, 122, 548–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.096>
- Lu, L., Wang, H., Yun, S., Hu, J. & Wang, M. (2024). A state-of-the-art review of novel aerogel insulation materials for building exterior walls. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 16231–16252. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2424915>
- Naciones Unidas (2015). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I., Gao, T. & Wallevik, O.H. (2015). Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.064>
- Niculescu, A. G., Tudorache, D. I., Bocioagă, M., Mihaiescu, D. E., Hadibarata, T. & Grumezescu, A. M. (2024). An Updated Overview of Silica Aerogel-Based Nanomaterials. *Nanomaterials*, 14(5), 1-23. <https://doi.org/10.3390/nano14050469>
- Rashid, A. B., Shishir, S. I., Mahfuz, Md. A., Hossain, Md. T. & Hoque, Md. E. (2023). Silica Aerogel: Synthesis, Characterization, Applications, and Recent Advancements. *Particle & Particle Systems Characterization*, 40(6), 1-22. <https://doi.org/10.1002/ppsc.202200186>

- Saboktakin, A. & Saboktakin, M. R. (2015). Improvements of reinforced silica aerogel nanocomposites thermal properties for architecture applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 230–234. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.024>
- Wang, J., Petit, D. & Ren, S. (2020). Transparent thermal insulation silica aerogels. *Nanoscale Advances*, 2(12), 5504–5515. <https://doi.org/10.1039/D0NA00655F>
- Xiong, F., Zhou, J., Jin, Y., Zhang, Z., Qin, M., Han, H., Shen, Z., Han, S., Geng, X., Jia, K. & Zou, R. (2024). Thermal shock protection with scalable heat-absorbing aerogels. *Nature Communications*, 15, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51530-3>