

## Aerogel: síntesis y aplicaciones en ingeniería

Aerogel: Synthesis and applications in engineering

Ing. Joel Rugerio-González<sup>1</sup>, Dr. José Martínez-Trinidad<sup>2</sup>, Dr. Luis Alfonso Moreno-Pacheco<sup>3</sup>,  
Dr. Juan Gabriel Barbosa-Saldaña<sup>4</sup> y Dr. Ricardo Andrés García-León<sup>5</sup>

<sup>1</sup> LABINTHAP, Instituto Politécnico Nacional, ESIME-Zacatenco, México, Email: jrugerio1400@alumno.ipn.mx, Orcid:<https://orcid.org/0009-0006-5901-7669>

<sup>2</sup> Grupo Ingeniería de Superficies, Instituto Politécnico Nacional, ESIME-Zacatenco, México, Email: jomartinez@ipn.mx, Orcid:<https://orcid.org/0000-0002-5445-2681>

<sup>3</sup> LABINTHAP, Instituto Politécnico Nacional, ESIME-Zacatenco, México, Email: lamoreno@ipn.mx, Orcid:<https://orcid.org/0000-0001-8723-8836>

<sup>4</sup> LABINTHAP, Instituto Politécnico Nacional, ESIME-Zacatenco, México, Email: jbarbosas@ipn.mx, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8590-8082>

<sup>5</sup> Universidad del Magdalena, programa de ASST, Santa Marta, Colombia, Email: ragarcial@unimagdalena.edu.co, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2734-1425>

Cómo citar: J. Rugerio-González, J. Martínez-Trinidad, L.A. Moreno-Pacheco, J.G. Barbosa-Saldaña y R.A. Gracia-león, "Aerogel: síntesis y aplicaciones en ingeniería", Rev. Ingenio, vol. 22, n°1, pp. 1-9, 2025, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.5312>

Recibido: 29 de julio de 2024/ Evaluado: 28 de agosto de 2024/ Aprobado: 18 de septiembre de 2024 /Publicado: 01 de octubre de 2024

### RESUMEN

#### Palabras clave:

Aerogel, Nanomateriales,  
Sílice, Síntesis Sol-Gel.

Los aerogeles son nanomateriales ultraligeros y altamente porosos desarrollados desde la década de los años 1930, que han evolucionado hasta convertirse en materiales clave para la ciencia y la industria. Su estructura nanoporosa y su muy baja densidad otorgan propiedades excepcionales, entre ellas una baja conductividad térmica, que los hacen útiles en sectores como la aeroespacial, construcción, electrónica y energía. Este artículo presenta una visión integral sobre los aerogeles, describiendo su síntesis y aplicaciones industriales. La síntesis se realiza principalmente mediante la técnica de sol-gel, con precursores como el silicato de sodio, catalizadores y diferentes métodos de secado, siendo el secado supercrítico como método preferido para conservar la estructura nanoporosa. A pesar de sus ventajas, los aerogeles enfrentan desafíos como la fragilidad y el alto costo de producción. Sin embargo, los avances en métodos más sostenibles y el uso de materiales reciclados buscan superar estas limitaciones. Se concluye que los aerogeles son materiales modernos y prometedores con alto potencial para revolucionar múltiples industrias gracias a innovaciones en síntesis y procesamiento.

### ABSTRACT

#### Keywords:

Aerogel, Nanomaterials,  
Silica, Sol-Gel Synthesis.

Aerogels are ultralight and highly porous nanomaterials developed since the 1930s, which have evolved into key materials for science and industry. Their nanoporous structure and very low density provide exceptional properties, including low thermal conductivity, making them useful in sectors such as aerospace, construction, electronics, and energy. This article presents a comprehensive overview of aerogels, describing their synthesis and industrial applications. The synthesis is mainly carried out using the sol-gel technique, with precursors such as sodium silicate, catalysts, and various drying methods, with supercritical drying being the preferred method to preserve the nanoporous structure. Despite their advantages, aerogels face challenges such as fragility and high production costs. However, advances in more sustainable methods and the use of recycled materials aim to overcome these limitations. It is concluded that aerogels are modern and promising materials with high potential to revolutionize multiple industries through innovations in synthesis and processing.

## 1. Introducción

En las últimas décadas, los aerogeles han captado gran atención debido a sus propiedades únicas y su potencial para ser aplicados en tecnologías avanzadas que buscan eficiencia energética y sostenibilidad. Su estructura nanoporosa ultraligera no solo ofrece excelentes capacidades de aislamiento térmico y acústico, sino que también abre nuevas posibilidades en campos como la electrónica, la protección ambiental y la ingeniería médica. La constante innovación en sus métodos de síntesis, así como el desarrollo

de aerogeles híbridos y modificaciones en sus propiedades de manera controlada, posicionan a estos materiales como clave en la transición hacia materiales más sostenibles y multifuncionales en la industria moderna.

### 1.1. Antecedentes

Los aerogeles fueron desarrollados en la década de 1930 por Samuel Kistler al reemplazar el líquido en un gel por gas sin colapsar su estructura [1]. Desde entonces, las investigaciones han avanzado para mejorar sus propiedades

#### Autor para correspondencia

Correo electrónico: jrugerio1400@alumno.ipn.mx (Joel Rugerio-González)



La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña  
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)

térmicas y mecánicas, ampliando sus aplicaciones en la industria aeroespacial, construcción y energía. Actualmente, existen aerogeles inorgánicos, orgánicos e híbridos, lo que aumenta su versatilidad y relevancia industrial [2].

Estos nanomateriales poseen propiedades excepcionales. En la década de 1990, la NASA utilizó los aerogeles como aislantes térmicos y para capturar partículas de polvo cósmico en misiones espaciales [3]. Por ejemplo, en la misión Pathfinder Mars, los aerogeles protegieron al rover Sojourner, manteniendo su temperatura interior estable a 21 °C, frente a las temperaturas nocturnas de hasta -67 °C en Marte [3].

Los aerogeles de sílice destacan por su muy baja conductividad térmica, que varía entre 0.015 a 0.02 W/m K, y densidades muy bajas, desde 0.003 a 0.5 g/cm<sup>3</sup> [4] [5], lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren materiales ligeros y un gran aislamiento térmico.

La familia de aerogeles se amplió con la incorporación de chalcogeles fabricados a partir de azufre, selenio y cadmio, capaces de absorber metales pesados y contaminantes del agua, como mercurio y plomo [6]. En materiales compuestos, se han desarrollado técnicas para encapsular partículas de aerogel en resinas epoxi sin infiltrarlas, fortaleciéndolas y reduciendo su peso sin comprometer su estructura [7].

El mercado global de aerogeles crece a una tasa anual compuesta del 10-12% para la próxima década, impulsado por sectores como la automotriz, aeroespacial, construcción y energía. Destacan aplicaciones emergentes en baterías de vehículos eléctricos para gestión térmica y prevención de incendios [8]. Además, innovaciones en los métodos de fabricación buscan reducir costos y mejorar su escalabilidad, facilitando su adopción industrial [9].

### 1.2. Límites

A pesar de sus ventajas, el uso industrial de los aerogeles enfrenta desafíos como su fragilidad, alto costo de producción, dificultad de procesamiento y escalarlo para aplicaciones comerciales. Estas limitaciones han restringido su adopción masiva, aunque los avances recientes en síntesis y el uso de materiales reciclados buscan superar estos obstáculos.

### 1.3. Alcance

Este artículo busca describir de manera clara y concisa qué es un aerogel, sus principales propiedades, el proceso de síntesis y sus aplicaciones en la ingeniería actual. Se abordan los logros en investigación y desarrollo, así como tendencias que marcan su futuro en la industria.

### 1.4. Relevancia del Problema

La creciente demanda de materiales eficientes, ligeros y sostenibles en la industria moderna convierte los aerogeles en una alternativa estratégica para mejorar el rendimiento energético, reducir el impacto ambiental y habilitar nuevas tecnologías. Su potencial para revolucionar sectores como construcción, electrónica y energía señala la importancia de comprender y difundir su funcionamiento y aplicaciones.

### 1.5. Premisa

Se parte de que, gracias a su estructura y propiedades únicas, los aerogeles pueden adaptarse y optimizarse para resolver retos tecnológicos actuales, siempre que se superen sus limitaciones técnicas y económicas.

### 1.6. Objetivo

El objetivo de este artículo es presentar una visión integral sobre los aerogeles: definir qué son, explicar su síntesis, detallar sus propiedades y analizar sus principales aplicaciones industriales, con el fin de resaltar su relevancia y potencial como materiales modernos.

## 2. Desarrollo

### 2.1. Aerogel

El aerogel es un nanomaterial extremadamente ligero y nanoporoso, formado por una estructura tridimensional de partículas sólidas conectadas por finas hebras de apenas unos nanómetros.

Su composición puede contener hasta un 99.98% de aire, lo que le otorga una densidad extremadamente ligera, tan baja como 0.003 g/cm<sup>3</sup> y una apariencia etérea [2] [4], conociéndolo también como “humo azul” o “espuma transparente” [10].

Generalmente es fabricado a partir de sílice y sus propiedades pueden personalizarse para aplicaciones específicas [11]. Por lo que no existe un único tipo de aerogel ni una fórmula única, los aerogeles abarcan una amplia variedad de compuestos con distintas estructuras y geometrías.

Destacando por su variedad de propiedades como su muy baja conductividad térmica. La producción de aerogeles se realiza mediante la técnica Sol-Gel, en la que el líquido del gel se sustituye por aire bajo condiciones controladas para evitar el colapso de la estructura [12].

A pesar de sus ventajas, los aerogeles de sílice presentan desafíos como fragilidad, contracción volumétrica durante la producción, dificultades de procesamiento al combinarse con otros materiales y sobre todo su alto costo de producción [12][11]. Son útiles en aplicaciones especializadas como

soportes catalíticos, supercondensadores, barreras acústicas y aislantes térmicos [4].

## 2.2. Historia y evolución

El término “aerogel” fue acuñado por Samuel Kistler en 1931, quien desarrolló el proceso de secado supercrítico para reemplazar el líquido en un gel húmedo por aire sin colapsar su estructura porosa [1]. También sintetizó aerogeles de alúmina, óxido de tungsteno y óxido férrico, sentando las bases para la producción a gran escala [10].

En los años 90, la NASA utilizó aerogeles para capturar polvo cósmico y como aislantes térmicos en misiones espaciales, enfatizando su relevancia tecnológica [3]. Desde el año 2000, se han desarrollado aerogeles basados en polímeros y compuestos híbridos [13]. En 2013, el aerogel fue reconocido como el sólido más ligero del mundo [14].

Recientemente, la investigación se ha enfocado en hacer los aerogeles más rentables y sostenibles, mejorando su flexibilidad y propiedades mecánicas [15], lo que ha ampliado sus aplicaciones en la ingeniería aeroespacial, la construcción y la protección ambiental.

## 2.3. Clasificación

Los aerogeles pueden clasificarse según su presentación (monolitos, polvos, paneles, mantas), por su método de producción (aerogel, xerogel, criogel), por su microestructura (microporo, mesoporo, mixto) o por su composición química, siendo esta última la más útil para analizar y comprender sus propiedades [10]. Aunque tradicionalmente se fabrican a partir de sílice, los avances en síntesis han permitido desarrollar aerogeles con una amplia variedad de estructuras químicas (Figura 1), incluyendo:

**2.3.1. Inorgánicos.** Incluyen aerogeles metálicos (plata, oro, platino, aladió, aluminio) y de óxidos metálicos (alúmina, dióxido de titanio, óxido de zinc, óxido de zirconio), útiles en almacenamiento a alta temperatura, catálisis y aislamiento [10].

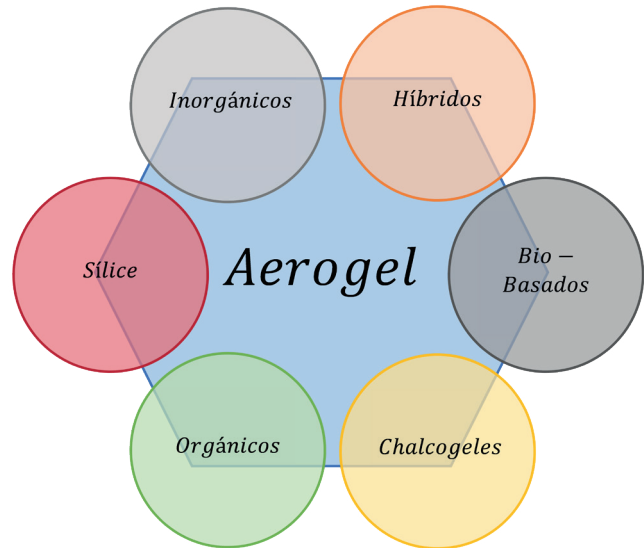
**2.3.2. Orgánicos.** Basados en polímeros como polímidas y resorcinol-formaldehído, empleados en aplicaciones industriales como aglutinantes y aislantes [10] [5].

**2.3.3. Híbridos.** Combinan materiales orgánicos e inorgánicos, integrando polímeros, metales y aditivos para mejorar propiedades físicas y mecánicas. Ejemplos notables son los compuestos de aerogel con nanotubos de carbono, grafeno o gelatina, que amplían su rango de aplicaciones y superan limitaciones tradicionales [10] [11].

**2.3.4. Chalcogeles.** Fabricados con azufre, selenio y cadmio, destacan por su capacidad de absorber contaminantes del

agua [10] [6].

**2.3.5 Bio-basados.** Derivados de celulosa y proteínas, son sostenibles y útiles en tecnologías limpias y captura de gases contaminantes [10].



**Figura 1.** Composición química del aerogel

El desarrollo de nuevas formulaciones y compuestos, como los Gelatina-Aerogel de sílice (GSA), ha permitido superar desafíos técnicos y expandir las aplicaciones de los aerogeles en diversos campos tecnológicos [11].

## 2.4. Propiedades

Los aerogeles de sílice son materiales amorfos y ultraligeros, formados por una red tridimensional de partículas sólidas interconectadas que contienen hasta un 99.98% de aire en su interior. Esta estructura les otorga una densidad extremadamente baja de hasta  $0.003 \text{ g/cm}^3$  [2] [4], y una textura similar a la espuma de poliestireno, aunque mucho más frágil. Con un volumen de poro del 90%, esta propiedad los hace ideales para aplicaciones que requieren ligereza y alta porosidad [5]. Por ello, los aerogeles de sílice presentan propiedades excepcionales como (Tabla 1):

**Tabla 1. Propiedades típicas de aerogeles de sílice**

Propiedades	Valor
Densidad bruta ( $g/cm^3$ )	0.003-0.5
Conductividad Térmica ( $W/mK$ )	0.015-0.021
Densidad de la red ( $g/cm^3$ )	1.7-2.1
Área superficial ( $m^2/g$ )	100-1,600
Porosidad (%)	80-99.8
Diámetro medio de poro ( $nm$ )	20-150
Diámetro de partícula primaria ( $nm$ )	2-10
Índice refractivo	1.007-1.24
Módulo de elasticidad ( $MPa$ )	0.002-100
Impedancia acústica ( $kg/m^2s$ )	$\times 10^4$
Coefficiente de expansión térmica	$2.0-4.0 \times 10^{-6}$
Constante dieléctrica	1-2
Velocidad del sonido ( $m/s$ )	100

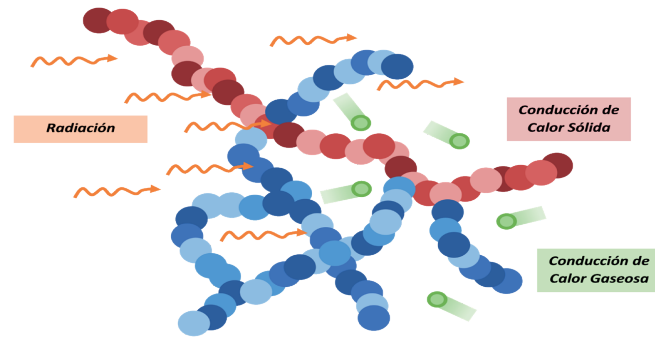
Fuente: [2] [4] [5]

**2.4.1. Estructura y porosidad.** El tamaño de poro de los aerogeles normalmente es mesoporo, con tamaños de poro interconectados que típicamente varía entre 5 y 100 nm, y un diámetro promedio de poro entre 20 y 40 nm, lo que les otorga una superficie específica muy alta, de 250 a 800  $m^2/g$  o incluso más [5]. Esta estructura puede ajustarse durante el proceso Sol-Gel para adaptar las propiedades finales del aerogel según sea la aplicación.

**2.4.2. Propiedades químicas.** Tras la síntesis, los aerogeles presentan grupos funcionales como silanol (Si-OH) en su superficie, que determinan su comportamiento “hidrofilico” o “hidrofóbico” [12]. A través de tratamientos químicos, es posible modificar su superficie para hacerlos repelentes al agua, ideal en aplicaciones donde se busca evitar la absorción de humedad [5] [12].

**2.4.3. Conductividad térmica.** Una de las propiedades más destacadas de los aerogeles de sílice es su muy baja conductividad térmica, que varía entre 0.015 W entre m K y 0.02 W entre m K, comparable o inferior a la del aire que es aproximadamente de 0.025 W entre m [4] [5]. Esta característica los convierte en los mejores aislantes térmicos sólidos conocidos y, al no ser inflamables, ofrecen mayor seguridad. La transferencia de calor en los aerogeles ocurre principalmente por conducción y radiación, ya que la convección es prácticamente nula debido al tamaño nanométrico de sus poros [16]. La conducción térmica se divide en dos fases, “la conducción térmica del gas”, que se refiere a la transferencia del calor a través del gas atrapado en los poros, y “la conducción térmica del sólido”, que se refiere a la transferencia de calor a través de la estructura sólida. En cuanto a la radiación térmica, se ve afectada por la absorción y dispersión al atravesar la estructura porosa [17] (Figura 2). De acuerdo con la teoría de transferencia térmica a nanoescala, el tamaño del poro y el efecto del gas enrarecido limitan la conducción térmica del gas, mientras que la dispersión de fotones afecta la radiación térmica

[18]. Además, los aerogeles son altamente permeables a la radiación infrarroja cercana, especialmente en el rango de longitudes de onda de 3-8  $\mu m$ , lo que a altas temperaturas incrementa su conductividad térmica y reducir su eficacia como aislante [17].

**Figura 2.** Transferencia de calor en el aerogel

**2.4.4. Propiedades ópticas.** Los aerogeles pueden ser transparentes u opacos y presentan una alta transmitancia de luz visible, lo que permite su uso en ventanas aislantes y dispositivos ópticos [19]. Sin embargo, tienden a dispersar la luz, generando una coloración amarillenta y una tonalidad azulada cuando se observan contra un fondo oscuro, lo que afecta la calidad óptica en ciertas aplicaciones [4].

**2.4.5. Propiedades acústicas.** Están relacionadas con el aislamiento térmico del aerogel, dependiendo de la naturaleza y presión del gas en sus poros, la densidad del aerogel y, principalmente, su textura. Al atravesar el aerogel, las ondas acústicas disminuyen su amplitud y velocidad, ya que la energía se transfiere gradualmente del gas a la red sólida [4]. Con una velocidad del sonido cercana a 100 m/s y una porosidad del 90%, son eficaces como aislantes acústicos [5].

**2.4.6. Propiedades mecánicas.** Aunque son muy ligeros, los aerogeles de sílice son frágiles y presentan baja resistencia mecánica [5]. Sin embargo, su compresibilidad y capacidad para absorber energía los hacen útiles en aplicaciones donde se requiere absorción de impactos o baja impedancia al choque [20]. Las versiones híbridas y reforzadas han mejorado significativamente estas propiedades [4].

**2.4.7. Propiedades dieléctricas.** Los aerogeles de sílice tienen una constante dieléctrica muy baja, alrededor de 1.1 [2] [12], lo que los hace ideales como materiales aislantes en electrónica avanzada, circuitos integrados y otros dispositivos de alta tecnología [4]. Donde su rigidez

dieléctrica, que indica el máximo campo eléctrico que puede soportar sin volverse conductores, es de aproximadamente de 128 kV/cm [21]. Además, existe una relación importante entre la constante dieléctrica y la conductividad térmica de los aerogeles, ambas influenciadas por su estructura porosa. Una alta porosidad implica baja conductividad térmica, afectando las propiedades dieléctricas, ya que la constante dieléctrica varía con la densidad del aerogel [21].

### 2.5 Precursores, Solventes y Catalizadores

La síntesis de aerogeles de sílice se realiza principalmente mediante la técnica Sol-Gel, utilizando alcóxidos de silicio como precursores, tales como el tetrametoxisilano (TMOS) y el tetraetoxisilano (TEOS). También se emplean derivados como el polietoxidisilano (PEDS) y el metiltrietoxisilano (MTES) [11] [22]. La pureza de estos compuestos es fundamental, ya que influye en las propiedades finales del aerogel [5]. Sin embargo, presentan desafíos debido a su alto costo y riesgo de manipulación (posibilidad de causar ceguera), lo que limita su aplicación comercial [11].

Además, se emplean disolventes como etanol, metanol y acetona, que facilitan la formación y estabilización del gel

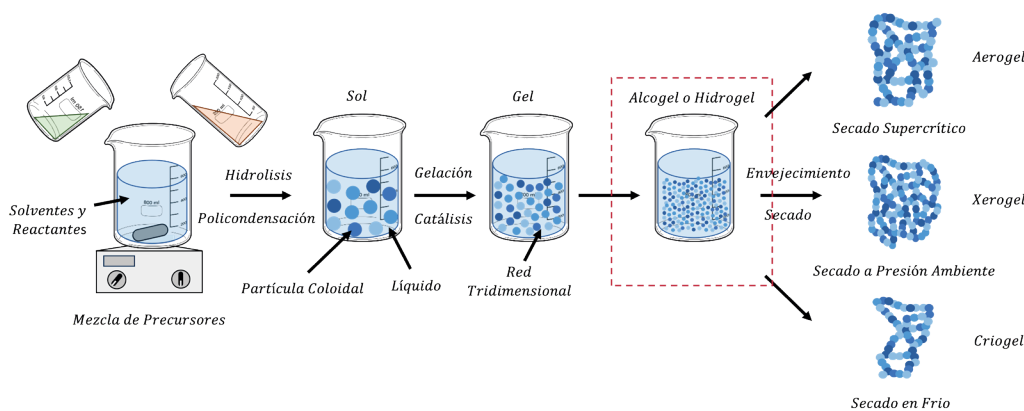
[11]. También el proceso requiere la adición de catalizadores ácidos o básicos para controlar la velocidad de gelificación y la estructura final del aerogel [11].

El uso combinado de catalizadores ácido-base (dos etapas) permite obtener materiales con mayor porosidad y mejor distribución de poros [5]. Alternativamente, el silicato de sodio (Na<sub>2</sub> SiO<sub>3</sub>-vidrio soluble) se utiliza como precursor en métodos comerciales, para reducir costos y facilitar la producción a gran escala [5] [11].

En la actualidad, se exploran rutas más sostenibles, utilizando materiales reciclados, como vidrio residual o cenizas de cáscara de arroz, para obtener sílice y producir aerogeles de bajo costo y menor impacto ambiental [23].

### 3. Sintetización

La sintetización de los aerogeles de sílice se realiza mediante el proceso Sol-Gel, valorado por su simplicidad, bajo costo y eficacia para producir aerogeles de alta calidad. Este proceso consta de tres etapas principales: (1) Formación del gel húmedo, (2) Envejecimiento del gel y (3) Secado del gel [11] (Figura 3).



**Figura 3.** Proceso sol-gel

#### 3.1. Formación del Gel Húmedo (Sol-Gel)

Este proceso incluye varias etapas: mezcla de precursores, hidrólisis, policondensación, gelación y otros pasos según el caso. Se empieza mezclando los precursores (TMOS, TEOS, Na<sub>2</sub> SiO<sub>3</sub>) con los disolventes, catalizadores y agua, lo que inicia la hidrólisis y policondensación para formar nanopartículas coloidales (Sol) menores a 1 µm.

Estas partículas se enlazan formando una red tridimensional abierta (Gel) [5]. Cuando el gel contiene mucho líquido, se denomina “alcogel”. Si se usan precursores naturales, se denomina “hidrogel” que contiene mucho más líquido [10]. Ambos son considerados etapas intermedias antes del material seco final.

Posteriormente continúa la gelificación, que implica la transición continua del Sol, al mediante la formación de enlaces siloxanos (Si-O-Si). Si esta transición es abrupta, se conoce como “transición Sol-Gel”. El tipo de catalizador (ácidos o bases) afecta en la textura y densidad del gel: la catálisis ácida produce geles menos densos y más porosos, mientras que la básica produce geles menos porosos y más densos [5].

Factores como el tipo de solvente, concentración de catalizador, pH y proporción de agua-precursor afectan la nanoestructura final, incluyendo el tamaño, la distribución de los poros y la textura [5].

### 3.2. Envejecimiento del Gel

El gel húmedo madura mediante el mecanismo de Ostwald, que refuerza la frágil red sólida mediante la unión y crecimiento de las partículas, mejorando la estabilidad mecánica y la porosidad [22]. Un control adecuado durante esta etapa puede mejorar propiedades como el módulo de elasticidad, la conductividad térmica, la resistencia a la flexión, la transmitancia óptica, densidad, resistencia y rigidez [10].

### 3.3. Secado del Gel

Esta última etapa es crítica, ya que determina las propiedades finales del aerogel. Durante el secado, los esfuerzos capilares pueden causar agrietamiento y encogimiento, aunque los geles de sílice resisten mejor estos efectos por sus enlaces siloxano [10]. Existen tres métodos principales de secado (Figura 3):

**3.3.1. Secado supercrítico (SCD).** Es el método más eficaz para preservar la estructura porosa, ya que elimina el solvente a altas temperaturas y presiones (Figura 4), evitando el colapso de la estructura porosa, al eliminar los esfuerzos capilares [10]. generando “aerogeles” monolíticos de baja densidad y alta área superficial, ideales para aislamiento térmico y acústico [11]. Este método puede utilizarse con diferentes solventes, aunque el  $\text{CO}_2$  es el más utilizado por ser la opción más segura y eficiente. A pesar de su eficacia, el proceso puede ser costoso y complejo, además de requerir modificaciones superficiales para mejorar la durabilidad química [11].

**3.3.2. Secado a presión ambiente (APD).** Este método es sencillo y de bajo costo, evaporando el solvente a temperatura y presión normales (Figura 4), siendo adecuado para la producción industrial [10]. Sin embargo, suele generar “xerogeles” de mayor densidad y con riesgo de agrietamiento [5]. Durante el secado, ocurre el fenómeno conocido como “Spring Back”, que recupera parte del volumen original del gel tras la contracción causada por las fuerzas capilares durante la evaporación del solvente, ayudando a preservar la estructura porosa [11]. La modificación superficial con agentes sililantes puede reducir la contracción volumétrica y producir aerogeles hidrofóbicos. Sin embargo, aún existe el riesgo de colapso por las tensiones internas, dificultando el control de las dimensiones finales del aerogel [11]. Aunque este proceso puede ser largo y con un alto consumo de solventes, el uso de co-precursores y la optimización del método, han hecho viable su producción a gran escala [24].

**3.3.3. Liofilización (FD).** Este método consiste en congelar el gel y sublimar el solvente bajo vacío (Figura 4), obteniendo “criogeles” altamente porosos, siendo útil para materiales sensibles al calor y aplicaciones médicas que requieren

mantener la integridad estructural. Aunque es más seguro y ecológico, es un proceso lento, costoso y la cristalización del solvente puede dañar la estructura [10]. Se recomienda realizar la congelación rápida y uso de solventes adecuados para minimizar estos problemas [5].

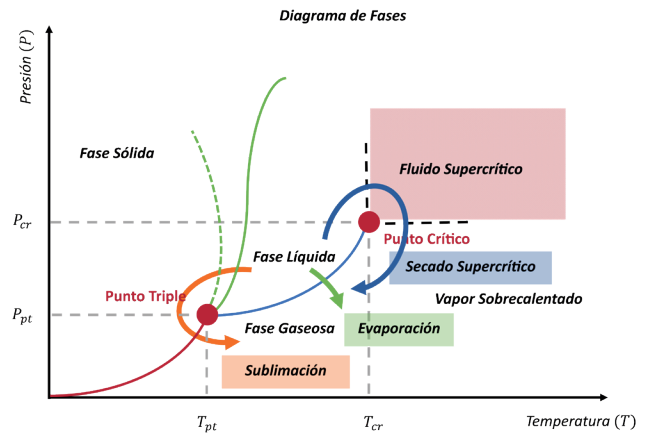


Figura 4. Diagrama de fase en las etapas de secado

## 4. Aplicaciones en la industria

Los aerogeles, gracias a su baja densidad, alta porosidad y excelentes propiedades térmicas, acústicas y químicas, tienen aplicaciones en diversas industrias. Destacando en los siguientes y posibles campos (Figura 5):

### 4.1. Aislamiento térmico y acústico

**4.1.1. Construcción.** Se utilizan en ventanas, paredes y techos para mejorar el aislamiento, térmico y acústico de edificios, reducir el consumo energético y mejorar el confort [12] [25].

**4.1.2. Transporte.** Aplicados en automóviles, trenes y aviones para reducir el peso, mejorar la eficiencia energética y proteger baterías contra el fuego y el calor [26] [27].

**4.1.3. Industria Petroquímica y Energética.** Utilizado para aislamiento en tuberías, tanques y equipos a altas temperaturas, beneficiando de su ligereza y resistencia a la corrosión [5].

### 4.2. Absorción y filtración

**4.2.1. Protección ambiental.** Los aerogeles de celulosa y carbono adsorben aceites, contaminantes orgánicos y metales pesados, útiles en limpieza de derrames y tratamiento de aguas residuales [6].

**4.2.2. Captura de partículas.** Utilizados por la NASA para capturar polvo cósmico y preservar muestras en misiones

espaciales [3].

4.3.1. *Catalizadores*. Su gran área superficial y estabilidad química los hacen excelentes para catalizadores en procesos industriales y síntesis química [12].

4.3.2. *Adsorbentes y Extractantes*. Utilizados para adsorción selectiva de gases, vapores y compuestos tóxicos en procesos industriales y ambientales [12] [10].

4.3.3. *Luminiscencia*. La combinación con las propiedades lumínicas y electrónicas de los fullerenos, permiten materiales multifuncionales con emisión de luz visible para optoelectrónica y sensores [28].

#### 4.4. Electrónica y energía

4.4.1. *Aislantes eléctricos*. Su baja constante dieléctrica los hace ideales para circuitos integrados y componentes electrónicos avanzados [4] [12].

4.4.2. *Baterías y almacenamiento de energía*. Mejoran la seguridad y gestión térmica en baterías de vehículos eléctricos [27].

4.4.3. *Celda Solares*. Sirven como plantilla porosa y ligera que permite fabricar fotoánodos de TiO<sub>2</sub> para mejorar el rendimiento de las celdas solares [12] [29] [30] [31].

4.4.4. *Sensores y Detectores*. Utilizados en dispositivos ópticos y sensores, como en detectores Cherenkov para física de partículas [4].

#### 4.5. Absorción de energía cinética

4.5.1. *Amortiguamiento*. Se utiliza como material para aligerar y disipar energía [32].

4.5.2. *Protección Balística y Contra Impactos*. Usados en recubrimientos balísticos para absorber impactos y vibraciones [20].

#### 4.6. Otras aplicaciones

4.6.1. *Textiles*. Incorporados en ropa para deportes extremos y protección, brindando aislamiento térmico con mínimo peso [12] [26].

4.6.2. *Agricultura y Farmacéutica*. Utilizados para mejorar la conservación de la comida, crecimiento de tejidos orgánicos y liberación controlada de fármacos [33].

4.6.3. *Recubrimientos*. Añadidos a pinturas y barnices para mejorar el aislamiento y protección superficial [12] [34].

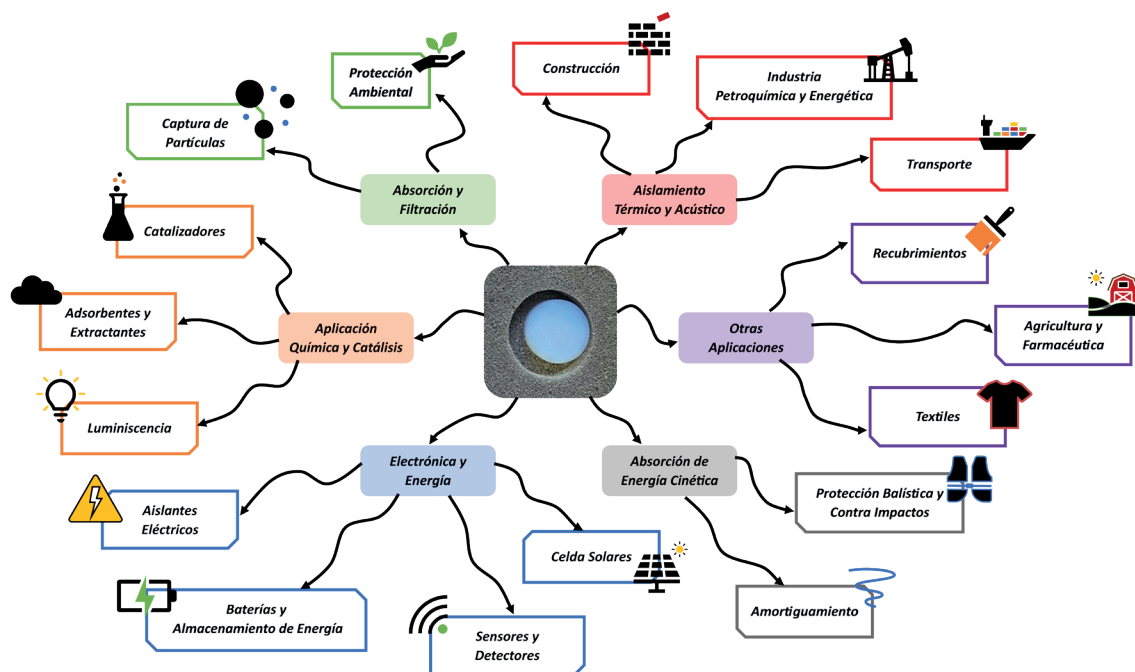


Figura 5. Campos de Aplicación

## 5. Conclusiones

Los aerogeles, gracias a su estructura nanoporosa y baja densidad, son materiales únicos con propiedades excepcionales, especialmente como aislantes térmicos. Por ello, con este artículo se buscó informar sobre qué son, cómo se sintetizan y en qué industrias se aplican, como la aeroespacial, construcción, electrónica y protección ambiental, destacando como el aerogel es relevante cada vez más en la industria y en la ciencia.

Sobre todo, como la elección del método de secado y las condiciones de síntesis determinan propiedades clave como densidad, porosidad, conductividad térmica y resistencia mecánica. A pesar de los desafíos persistentes, como la fragilidad y el costo de producción, las investigaciones actuales avanzan hacia soluciones más sostenibles mediante nuevas rutas de síntesis y el uso de materiales reciclados.

Finalmente, los aerogeles se posicionarían como una alternativa innovadora y prometedora para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el futuro.

## 6. Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional (IPN), al Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) y a los Dres. Involucrados, por el apoyo brindado para el desarrollo de este artículo.

## 7. Referencias

- [1] S. S. Kistler, "Coherent Expanded Aerogels and Jellies," *Nature*, vol. 127, pp. 741-741, 1931, doi: <https://doi.org/10.1038/127741a0>
- [2] F. Akhter, S. Ahmed Soomro y V. J. Inglezakis, "Silica Aerogels; A Review of Synthesis, Applications and Fabrication of Hybrid Composites," *Journal of Porous Materials*, vol. 28, pp. 1387-1400, 2021.
- [3] S. M. Jones, "Aerogel: Space Exploration Applications," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 40, pp. 351-357, 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/s10971-006-7762-7>
- [4] N. Hüsing y U. Schubert, "Aerogels—Airy Materials: Chemistry, Structure, and Properties," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 37, pp. 22-45, 1998, doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3773\(19980202\)37:1/2<22::AID-ANIE22>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3773(19980202)37:1/2<22::AID-ANIE22>3.0.CO;2-I)
- [5] M. A. Aegerter, N. Leventis y M. M. Koebel, *Aerogels Handbook*, 1 ed., New York: Springer, 2011.
- [6] S. Bag, P. Trikalitis y P. J. Chupas, "Porous Semiconducting Gels and Aerogels from Chalcogenide Clusters," *Science*, vol. 317, pp. 490-493, 2007, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1142535>
- [7] N. Gupta y W. Ricci, "Processing and Compressive Properties of Aerogel/Epoxy Composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, pp. 178-182, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.084>
- [8] S. Selim y J. Edmondson, "Aerogels 2025-2035: Technology, Market, Forecasts," IDTechEx, 2025. [En línea]. Available: <https://www.idtechex.com/en/research-report/aerogels-2025-2035-technology-market-forecasts/1076>.
- [9] ResearchAndMarkets, "The Global Market for Aerogels 2025-2035," GlobeNewswire News Room, 2025. [En línea]. Available: [https://www.researchandmarkets.com/report/aerogel?srsId=AfmBOoo\\_](https://www.researchandmarkets.com/report/aerogel?srsId=AfmBOoo_)
- [10] A. A. Parwaz Khan, M. Omaish Ansari y A. Khan, *Advances in Aerogel Composites for Environmental Remediation*, Elsevier, 2021, pp. 3, 114.
- [11] M. Sachithanadam y S. C. Joshi, *Silica Aerogel Composites*, Springer Engineering Materials, 2016, pp. 6, 7.
- [12] J. L. Gurav, I.-K. Jung y H.-H. Park, "Silica Aerogel: Synthesis and Applications," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2010, pp. 1-11, 2010, doi: <https://doi.org/10.1155/2010/409310>
- [13] M. Piñero, V. Morales y N. De la Rosa, "Mechanical Properties of Silica Hybrid Aerogels," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, pp. 1-4, 2005.
- [14] G. Chao, "Least Dense Solid," Guinness World Records, 2013. [En línea]. Available: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/least-dense-solid>.
- [15] M. E. Ghica, J. G. S. Mandinga y T. Linhares, "Improvement of the Mechanical Properties of Silica Aerogels for Thermal Insulation Applications through a Combination of Aramid Nanofibres and Microfibres," *Gels*, vol. 9, pp. 1-18, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/gels9070535>
- [16] B. Merillas, J. P. Varela y J. M. de León, "Thermal Conductivity of Nanoporous Materials: Where Is the Limit?," *Polymers*, vol. 14, pp. 1-23, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14132556>
- [17] F. Lou, S. Dong y K. Zhu, "Thermal Insulation Performance of Aerogel Nano-Porous Materials: Characterization and Test Methods," *Chemistry of Materials*, vol. 9, pp. 1-30, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/gels9030220>
- [18] G. H. Tang, C. Bi y Y. Zhao, "Thermal Transport in Nano-Porous Insulation of Aerogel: Factors, Models and Outlook," *Energy*, vol. 90, pp. 701-721, 2015., doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.109>

- [19] K. I. Jensen, J. M. Schultz y F. H. Kristiansen, Development of Windows Based on Highly Insulating Aerogel Glazings, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.047>
- [20] J. Xie, L. Niu y Y. Qiao, “Impact Energy Absorption Behavior of Graphene Aerogels Prepared by Different Drying Methods,” *Materials & Design*, vol. 221, pp. 1-9, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110912>
- [21] L. W. Hrubesh y R. W. Pekala, *Dielectric Properties and Electronic Applications of Aerogels, Sol-Gel Processing and Applications*, 1993.
- [22] M. Guglielmi, G. Kickelbick y A. Martucci, *Sol-Gel Nanocomposites*, Springer Nature, 2014.
- [23] N. Asim, M. Badiei y M. A. Alghoul, “Biomass and Industrial Wastes as Resource Materials for Aerogel Preparation: Opportunities, Challenges, and Research Directions,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, pp. 17621-17645, 2019
- [24] S. D. Bhagat, Y. H. Kim y Y. S. Ahn, “Rapid Synthesis of Water-Glass Based Aerogels by in Situ Surface Modification of the Hydrogels,” *Applied Surface Science*, vol. 253, pp. 3231-3236, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.07.016>
- [25] A. Khouya Oumaima, B. Naoual y E. Latifa, “Sustainable Aerogel Blankets from Recycled Plastics and Construction Waste for High-Performance Thermal Insulation,” *Hybrid Advances*, vol. 11, pp. 1-6, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100538>
- [26] Tanchain, “Aerogel Application,” Tanchain, 2022. [En línea]. Available: <https://www.tchaintech.com/ES/SDETAIL/Aerogel-Applications>.
- [27] Aspen, “Aspen Aerogels Applications,” Aspen, 2025. [En línea]. Available: <https://www.aerogel.com/es/applications>.
- [28] L. Zhu, W. Li y J. Wang, “Intense Visible Light Emission From Fullerene-Doped Silica Aerogel,” *Journal of Applied Physics*, vol. 77, pp. 2801-2803, 1995, doi: <https://doi.org/10.1063/1.358685>
- [29] I. Ahmad, M. M. Abduljawad y Y. A. Alassmy, “Recent Advances in Aerogels Photocatalysts for Solar Fuel Generation: A Review,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 199, pp. 1-28, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.109854>
- [30] E. Espinel, E. Noberto y J. E. Barbosa, “Estudio para la Generación de Energía por un Sistema con Paneles Solares y Baterías,” *Ingenio*, vol. 17, pp. 9-14, 2020, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2392>
- [31] J. Raglend, G. Bhatti y J. Swaminathan, “Perspectiva Actual de las Redes de Sensores Inalámbricos para la Captación de Energía Solar,” *Ingenio*, vol. 19, pp. 16-21, 2022, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3039>
- [32] R. Liu, X. Pan y Z. Mao, “Well-Cushioned and Highly-Elastic Aerogel for Multifunctional Intelligent Transportation Packaging,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 493, pp. 1-11, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152660>
- [33] F. Rafieian, A. Dufresne y G. Askari, “Aerogels as Novel Ingredients: Production, Properties and Applications in Medical, Food and Environmental Sectors,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 687, pp. 1-21, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133410>
- [34] Y. Xiang, M. Yan y L. Li, “Low Thermal Conductivity and Self-Cleaning Silica Aerogel Coating Based on a Secondary Coating Encapsulation Strategy,” *Construction and Building Materials*, vol. 472, pp. 1-10, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140878>