

Análisis de la síntesis y productividad de los aerogeles de sílice en la industria

Garrido Minutti, Samara

2024

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/6008>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

Análisis de la síntesis y productividad de los aerogeles a base de silicio en la industria

Garrido Minutti Samara (cuarto semestre en Ingeniería Química)¹, Hernández Trinidad Marco Josué (cuarto semestre en Ingeniería Industrial)^{1,*}, Jiménez Caballero Josafat (cuarto semestre en Ingeniería Química)¹, López Manzano Pablo Eduardo (tercer semestre en Ingeniería Biomédica)¹, Gregorio Romero de la Vega (asesor externo)¹ y Antonio Benítez Ruiz (profesor asesor)¹.

¹Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México

Resumen

Se realizó un estudio comparativo entre distintos métodos de síntesis de aerogeles a base de silicio, que son ampliamente utilizados en la industria con la finalidad de evaluar las propiedades fisicoquímicas, productividad, así como sus aplicaciones interdisciplinarias en la industria de los productos resultantes. Las técnicas analizadas son: secado supercrítico asistido con CO₂, secado por microondas y secado a presión ambiente, de esta manera se destacan las capacidades estructurales del aerogel, como la densidad, porosidad, área superficial, conductividad térmica e insumos totales. El método supercrítico asistido con CO₂ muestra ventajas en la mayoría de estas categorías, con menor densidad, mayor área superficial y menor conductividad térmica, atribuibles a su proceso de extracción de solvente y envejecimiento. En cuanto a la productividad, tomando como referencia el área superficial total, el secado supercrítico asistido con CO₂ se destaca como el más productivo, mientras que el secado por microondas muestra una productividad más baja debido a los altos costos de síntesis. Además, se presentan tres aplicaciones en ingeniería química, industrial y biomédica, donde se evidencia la versatilidad del aerogel gracias a sus propiedades físicas, capacidades de aislamiento térmico, aislamiento acústico, alta porosidad y baja densidad. Se destaca su utilidad en tratamientos tisulares, adsorción de aceites, recubrimiento térmico acústico en la industria petrolera y aplicaciones en aviación y automotriz. Para finalizar, esta comparativa proporciona una visión de los diferentes métodos de síntesis de aerogeles y su impacto en diversas áreas industriales para generar interés en el uso de aerogel como un material innovador.

Palabras clave: aerogel, sílice, síntesis, comparativa.

***Autor Corresponsal:** samara.garrido@iberopuebla.mx

Introducción

El término "aerogel" se refiere a un material amorfo altamente poroso, con una porosidad que supera el 95%, compuesto principalmente por una fase gaseosa. Típicamente está compuesto por nanopartículas de silicio, sin embargo, también puede estar compuesto de óxidos metálicos como aluminio, magnesio, cromo, titanio, plata o zirconio, así como de polímeros orgánicos como resorcinol-formaldehído, resinas fenólicas, melamina-formaldehído o siloxanos. Se debe recalcar que el término no está reconocido en el diccionario de la lengua española, por lo cual en este documento se utilizará la traducción literal del inglés. La característica distintiva de los aerogeles es su estructura extremadamente ligera y porosa, considera más una red coloidal abierta no fluida o una red polimérica que se expande a lo largo de su volumen gracias a un gas, creando una compactación de red inducida por el agente del gel, generando de esta manera sus características tan distintivas [1].

Los aerogeles de sílice suelen combinarse con fibras, polímeros, aglutinantes, etc., que poseen características excepcionales y únicas, como una alta porosidad (entre el 80% y el 99%), una gran área superficial (hasta 1200 m²/g), una baja densidad (hasta 0,003 g/cm³) y una baja conductividad térmica (entre 0,005 y 0,021 W/(m·K)). La baja conductividad térmica de los aerogeles de sílice, junto con sus características no inflamables, los convierte en materiales idóneos para sistemas de aislamiento térmico. Sin embargo, presentan limitaciones en cuanto a su resistencia mecánica y son difíciles de procesar sin provocar fracturas

en el material final. Su elaboración se basa normalmente en 3 diferentes fases, las cuales logran las propiedades características de los aerogeles formando redes compactas para la creación de la porosidad: síntesis, envejecimiento y Los aerogeles por su excelente capacidad como aislantes térmicos debido a su densa estructura, son ampliamente utilizados en la industria, así como en el aislamiento de ventanas de edificios de oficinas para regular la temperatura interna. Añadiendo que su liviano peso molecular los hace idóneos para su uso en estructuras aéreas fomentando su uso en la industria aeroespacial. Otras de sus destacables aplicaciones son la desalinización del agua, la captura de partículas, propiedad que es empleada en la limpieza de derrames de petróleo en el mar y la absorción de metales pesados como plomo y mercurio del agua. Los aerogeles también encuentran utilidad como material a prueba de balas, aislamiento acústico en ventanas y paredes, recubrimientos antirreflejantes y trajes térmicos para soportar condiciones extremas de temperatura [2,3,4].

Para desarrollar los métodos de síntesis analizados de aerogeles, es esencial crear una fase llamada "sol-gel", que implica la interacción de reacciones de hidrólisis y condensación entre precursores y catalizadores seleccionados. Un sol es una suspensión estable de partículas sólidas en un líquido, mientras que un gel es una red sólida porosa que se expande en un líquido. Esta etapa resulta en una red sólida nanoestructurada con mezcla homogénea a nivel atómico [5,1].

En el envejecimiento ocurre la etapa crucial de este proceso, cuando el esqueleto se fortalece con reacciones de policondensación que continúan en la red de gel durante

ciertos períodos de tiempo. Estos intervalos de tiempo influyen en la estructura y las propiedades de los aerogeles. Por ejemplo, los geles con un período de envejecimiento breve pueden experimentar un colapso parcial de los poros durante el secado a presión ambiente del fluido poroso. Esto se debe a que tienen estructuras de red menos maduras y organizadas, lo que resulta en colapsos [6].

La etapa final en la síntesis de aerogeles implica el secado del "sol-gel" obtenido, durante el cual se elimina el solvente o líquido presente en los poros, dejando únicamente la estructura tridimensional sólida. Este proceso es crucial, ya que las características y propiedades del producto final dependen del enfoque o método aplicado. Los procedimientos más comúnmente utilizados en la industria son: Secado Supercrítico: Este método emplea una autoclave, donde se controlan la temperatura y la presión para convertir el solvente en estado supercrítico. Luego, se libera gradualmente a temperatura constante. Alternativamente, se puede usar CO₂ para extraer el solvente orgánico bombeándolo en la muestra. Secado por evaporación: en donde se evapora el solvente orgánico a presión atmosférica o al vacío, alcanzando su punto de ebullición y siendo extraído por evaporación. Liofilización: Se congela el solvente y se sublima bajo una baja presión atmosférica, mediante una presión y temperatura adecuadas [1].

Dada la revisión del estado del arte se pueden observar diferentes autores y bibliografías que describen la síntesis de los aerogeles en sus diferentes ámbitos y aplicaciones, es necesario tenerlos en cuenta para un análisis preciso desde sus diferentes puntos de vista y características, por lo que, a continuación, se presentan 2 artículos a resaltar. El artículo [7] se destaca el uso de aerogeles como andamios en ingeniería tisular debido a su porosidad, baja densidad y alta área específica. Estos andamios deben tener poros interconectados del tamaño adecuado para integrar el tejido y permitir su vascularización, ser biodegradables, tener química superficial para la adhesión celular y propiedades mecánicas similares al tejido. Los aerogeles, con su fabricación fácil y biocompatibilidad, necesitan mejorar su macroporosidad para favorecer la migración celular. Los andamios de aerogel basados en celulosa reproducen la matriz extracelular in vivo, siendo adecuados para aplicaciones biomédicas [7].

De acuerdo con el artículo [8] se explora el uso del titanato (óxido de titanio) como catalizador en la síntesis de poliésteres, a pesar de sus desafíos, como su sensibilidad a altas temperaturas. Se propone la optimización del proceso mediante la creación de un aerogel. El método incluye la preparación de tetraetilo silicato, prehidrólisis con etanol, agua desionizada, tetraetoxisilano y ácido clorhídrico, formando un sol-gel con la adición de titanio. Luego, se somete a agitación magnética, embudo de goteo y baño maría, seguido de un reposo a presión atmosférica y un proceso de secado en horno. Los aerogeles resultantes son analizados, mostrando alta área superficial, viscosidad entender su morfología. Ya que se va a analizar el proceso en términos de productividad, el total de los precios utilizados aproximados de los materiales y reactivos en el proceso de síntesis por medio de secado supercrítico asistido

intrínseca y contenido de ácido de Lewis, demostrando mejor resistencia a la hidrólisis que el titanato de tetrabutilo tradicional, con una reducción favorable en el grupo carboxilo final [8].

Debido al crecimiento exponencial de sus aplicaciones dentro de la industria y las predominantes limitaciones dentro de éste, como su complejidad técnica y el acceso a la información limitado y poco específico en cuestión de productividad y propiedades fisicoquímicas, éste proyecto se tuvo como propósito, analizar la síntesis, producción y aplicación de tres diferentes tipos de aerogeles a base de silicio para generar una comparativa de sus respectivos procesos y aplicaciones, para así tener en cuenta como objetivos específicos los cuales son : Analizar tres diferentes tipos de síntesis química de aerogeles a base de silicio de diferentes autores para generar una comparativa de sus propiedades y procedimiento, comparar la productividad de tres tipos de síntesis química de aerogeles a base de silicio, con el fin de seleccionar el método con mayor factibilidad, identificar campos de aplicación en la industria, así como sus aplicaciones para resaltar sus beneficios.

Metodología

Método de síntesis por secado supercrítico asistido con CO₂

Para el análisis y comparación se tomará en cuenta el trabajo [9], en el listado de reactivos se utilizó tetraetilortosilicato (TEOS, con pureza > 99.0 %), alcohol etílico de grado espectroscópico (200 proof, con pureza > 99.5 %), dimetilformamida (C₃H₇NO, con pureza > 99.0 %), agua desionizada catalizada por fluoruro de amonio (pureza a > 98.0%), además, se utilizó agua desionizada catalizada por ácido clorhídrico (0.15 M, con pureza > 99.0 %) y agua desionizada catalizada por hidróxido de amonio (concentración del 28-30 %). Para la fabricación y uso de la autoclave se utilizó un tubo de acero inoxidable resistente a alta presión, válvulas de entrada que controlan el gas a través del tubo hacia la cámara, termopar digital, una cámara de 18 cm de diámetro y 35 cm de longitud, 2 medidores de presión y una válvula de salida para despresurizar [9].

Se preparó mediante tetraetoxisilano, etanol, agua y ácido clorhídrico o NH₄OH. Los "soles" se calentaron, agregando C₃H₇NO como aditivo químico de control de secado, se gelifico y envejeció a temperatura ambiente. Los geles se lavaron con etanol para eliminar monómeros, introduciendo CO₂ a 55 bares en una autoclave, cambiando la fase de CO₂ de gas a líquido, las muestras fueron sometidas a un proceso térmico, alcanzando 700 °C en un horno. Mediante técnicas de caracterización se identificaron las propiedades físico químicas encontradas al finalizar el proceso de secado supercrítico asistido por CO₂ encontradas son las mencionadas a continuación: la densidad total fue de 0.05 g/cm³, el área superficial fue de 115 m²/gm, el porcentaje de porosidad fue de 86.33 % y la conductividad térmica la cual dio como resultado de 0.0063 W / mK, se presenta en la Fig. 1, la microscopía del aerogel, producido para poder con CO₂ fueron recabados por la misma compañía la cual es identificada como "Sigma Aldrich", el total centrado en materiales y reactivos fue de \$ 11,545.69 , mientras que el

total por partes del equipo fue de \$ 21, 782.39 dando un total de insumos de \$ 33,328.08 [9].

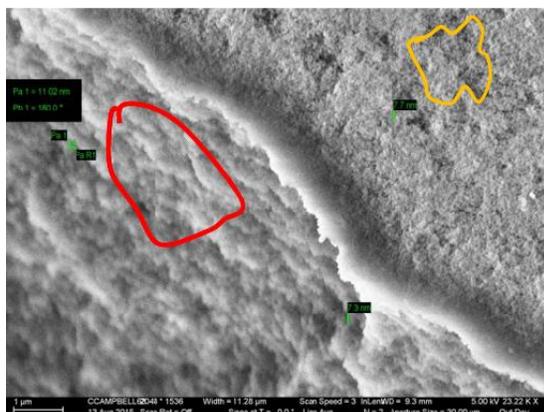


Fig. 1: SEM imagen de la prueba de aerogel [9].

Método de síntesis por secado rápido con microondas

En el análisis y comparación se tomará en cuenta el trabajo titulado “Materiales similares a aerogeles a base de sílice obtenidos mediante secado rápido en microondas”, redactado por L. Durães, et al. en 2013. Como materiales, reactivos principales utilizados se encuentran metiltrimetoxisilano al 98%, metanol al 99.8%, ácido oxálico al 99% de hidróxido de amonio al 25% en agua, horno con manejo de temperatura, sistema de filtrado al vacío con bomba, embudo de Büchner y microondas industrial. El procedimiento de síntesis se inició en la mezcla de precursores con ácido oxálico para provocar hidrólisis dentro del compuesto para después de 24 horas agregar hidróxido de amonio para la creación de silanoles teniendo en cuenta una temperatura controlada de 258°C. Haciendo uso del horno se calentó el sol a 278°C durante 4-5 horas para producir la gelación, para después un generar un envejecimiento de dos días, pasado el tiempo estos pasaron nuevamente por el horno a 60°C durante 24 horas para la eliminación del metanol y de esta manera ser lavados y filtrados al vacío, generando un cambio de solvente entre metanol y agua. Como último procedimiento se establecieron 3 muestras para 3 ciclos de secado: el primero a 100 W, repitiendo 5 veces 3 minutos de radiación continúa seguidos de 1 minuto de pausa; el segundo a 100 W, repitiendo 3 veces 5 minutos de radiación continúa seguidos de 1 minuto de pausa; el último a 450 W, repitiendo 3 veces 2 minutos de radiación constante, seguidos de 2 minutos de pausa, para finalmente dejarlos envejecer durante dos días. Por medio de técnicas de caracterización se concluyeron los resultados de sus propiedades fisicoquímicas, la densidad encontrada se dividió en los 3 ciclos, el primero con 91.3 kg/m³, el segundo 85.5 kg/m³ y el tercero con 76.4 kg/m³, así también la conductividad térmica con el orden ya

establecido, 0.044 W/m*K, 0.0042 W/m*K y 0.041 W/m*K, el porcentaje de porosidad fue de 94.1% y por último el área superficial resultante fue de 413 m²/g. Así mismo el precio total utilizado para la síntesis centrado en materiales y reactivos fue de \$ 4850.53, mientras que el total por partes del equipo fue de \$ 389,004.97 dando un total de insumos de \$ 393,855.5 [10].

Método de síntesis por secado a presión ambiente

Finalmente, se consideró el artículo titulado “Síntesis y caracterización del aerogel de sílice y sus materiales compuestos.”, redactado por L. Guangwu, et al. en 2017.

En el cual, se describe que el proceso de fabricación del aerogel de sílice inicia al disolver 30 ml de vidrio líquido con una relación molar SiO₂:Na₂O de 3,1 en 90 ml de agua desionizada, produciendo una solución de silicato en una proporción de 1:3 mediante el método sol-gel de un solo paso. El hidrogel de sílice se generó mediante la hidrólisis y policondensación del vidrio líquido. Continuando así, la solución de silicato se trató con amberlita para eliminar los iones de sodio no deseados, obteniendo un sol de sílice con un pH entre 2 y 3, lo que facilita la eliminación de los iones Na⁺ y la formación de sílice. Tras la gelificación, se maduró el hidrogel durante 6 horas y se llenó con agua desionizada a temperatura ambiente. Los monolitos compuestos se sumergieron en una solución de 8% de tetrametilsilano en n-hexano-etanol durante 12 horas a temperatura ambiente. Luego, los grupos hidroxilo en la superficie del aerogel se reemplazan por grupos metilo hidrófobos, eliminando el agua de los poros mediante la entrada de etanol. Para evaporar completamente el líquido de los poros, los monolitos se expusieron a una temperatura de 200°C durante 1 hora [11].

En los resultados de caracterización se demostraron propiedades destacadas como hidrofobicidad estable, baja densidad, gran área superficial y un volumen de poro significativo. La conductividad térmica del aerogel compuesto varía con la temperatura, mostrando tener un excelente efecto de aislamiento térmico a altas temperaturas. Se presentó una tabla que muestra los resultados de la investigación que establece que la densidad final del compuesto de aerogel es de 0,196 g/cm³, la conductividad térmica del aerogel a 25 °C es de 0,0229 W./(mK), el volumen de poros es de 2,6 cm³/g, el área de la superficie es 630 m²/g y el ángulo de contacto hidrofóbico es ~135°. Dado que el proceso fue analizado en términos de productividad, se observó las estimaciones acumuladas de precios utilizados para materiales y reactivos en el proceso de síntesis por secado a presión ambiente, recopiladas por la misma empresa, donde el total centrado en materiales y reactivos fue de \$ 8,372.14, mientras que el total por partes del equipo fue de \$ 16,738.26 dando un total de insumos de \$ 25,110.40 [11].

Resultados y Discusión

Comparativa de propiedades fisicoquímicas

La densidad es un aspecto importante que considerar dentro de los aerogeles ya que da la relación entre la masa de un cuerpo con el volumen que éste ocupa, como ya antes mencionado los aerogeles pueden llegar a tener muy bajas densidades cercanas a las del aire lo que genera que éstos puedan ser más flexibles y muy bajo peso por lo que facilita su transporte, así como su uso en instrumentos donde el peso final es de mayor importancia. Considerando las etapas del secado por microondas, con variaciones en potencia y tiempo, la síntesis con secado supercrítico asistido por CO₂ muestra la densidad más baja, mientras que los valores secundarios corresponden al secado por microondas. Los valores en la tabla son con aproximaciones, para una comparación más concisa como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1: Densidades encontradas dentro de la metodología

Método de síntesis	Densidad (g/cm ³)
Secado supercrítico asistido con CO ₂	0.05
Secado por medio de microondas 1	0.091
Secado por medio de microondas 2	0.085
Secado por medio de microondas 3	0.076
Secado a temperatura ambiente	0.196

A continuación, se muestra el área superficial, conocer esta propiedad es crucial para comparar aspectos como costo, productividad y desperdicio. Se aplicó en el análisis de productividad de tres métodos de síntesis basados en silicio, y se encontró que el método de secado supercrítico con soporte de CO₂ produce el producto de mayor área superficial, resultado que puede depender de las medidas y pesos empleados en el proceso, como se muestra en la Fig. 2 los diferentes resultados encontrados correspondientes al método utilizado.

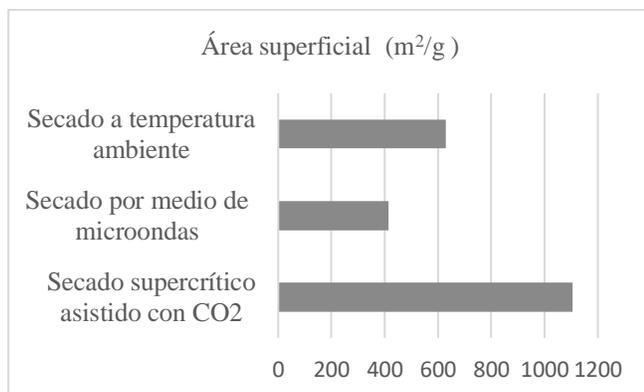


Fig. 2 Área superficial encontrada dentro de los diferentes métodos de síntesis.

Para continuar en la Tabla 2 se muestra el porcentaje de porosidad encontrado dentro de los métodos de síntesis, el método de secado por microondas muestra el mayor índice de porosidad, posiblemente por el sistema que influyó eficazmente en la extracción por solvente. Además, los valores del secado por microondas representan un promedio de las tres secciones mencionadas anteriormente, ya que presentaron una aproximación cercana dentro de los valores.

Tabla 2: Porcentaje de porosidad de los aerogeles de sílice para la identificación de su estructura

Método de síntesis	% Porosidad
Secado supercrítico asistido con CO ₂	89.4
Secado por medio de microondas	94.1
Secado a temperatura ambiente	92.4

Por último, se analizó la conductividad térmica siendo una de las propiedades más importantes dentro de los aerogeles, ya que es el principal motivo de su síntesis para diversas aplicaciones, teniendo en cuenta que el resultado está relacionado con el método de secado y envejecimiento. Esta comparación se observa en la Fig. 3, en W/mK, teniendo como resultado que el método de síntesis por medio de secado supercrítico asistido con CO₂ posee una menor conductividad térmica con gran diferencia entre los otros métodos.

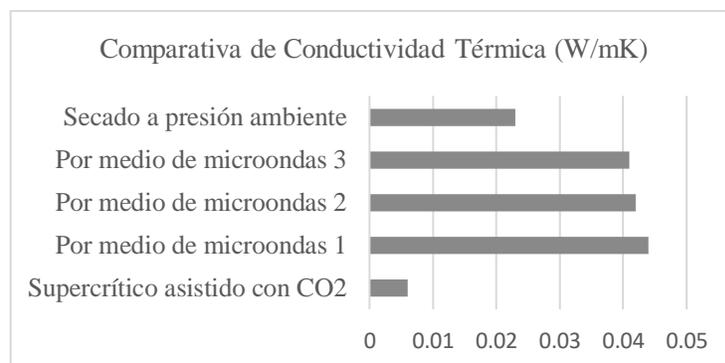


Fig. 3 Conductividad térmica de las muestras en su proceso final de los diferentes métodos de síntesis.

Comparación de Productividades

La comparativa de las productividades entre distintos métodos de síntesis se basa en el análisis de los costos totales de los insumos y equipos utilizados, así como en el área superficial de cada método. Esto permite realizar una comparativa para identificar el más factible económicamente. En la Tabla 3 se detallan los costos totales de los insumos y equipos utilizados en cada método de síntesis, junto con el área superficial correspondiente. Posteriormente, en la Tabla 4, se presentan los índices de productividad multifactoriales y totales de los tres métodos de síntesis, calculados en relación con los materiales y reactivos, los equipos y el área superficial.

Tabla 3: Costos totales de los insumos de cada método de síntesis.

Método	Área Superficial	Materiales y Reactivos	Equipo	Total de Insumos
I	1105	\$11,545.69	\$21,782.39	\$33,328.08
II	413	\$4,850.53	\$389,004.97	\$393,855.50
III	630	\$8,372.14	\$16,738.26	\$25,110.40

Tabla 4: Índices de productividad multifactoriales y totales de cada método de síntesis.

Método	Multifactorial (Materiales y Reactivos/AS)	Multifactorial (Equipo/AS)	Total
I	0.0957	0.0507	0.0332
II	0.0851	0.0011	0.0010
III	0.0752	0.0376	0.0251

El objetivo de calcular las productividades multifactoriales con respecto al área superficial (AS) es determinar el método más factible en función de la disponibilidad de materiales, reactivos y equipos. Según los resultados, el método I, Secado supercrítico asistido con Dióxido de Carbono, muestra los mayores índices de productividad, lo que lo convierte en la opción más recomendable para la síntesis de aerogel a base de silicio. Este método destaca por su amplia área superficial y un costo de insumos intermedio en comparación con los otros métodos.

El método II, Secado por microondas, resulta ligeramente más factible que el método III, Secado a presión ambiente, debido a sus menores costos de materiales y reactivos. Sin embargo, el elevado costo del equipo reduce su factibilidad, por lo que no se considera una opción ideal. En contraste, el método II, muestra la menor factibilidad cuando los equipos están disponibles, aunque podría ser considerado si no se dispone de ningún insumo aún, ya que sus costos son menores, aunque su área superficial es limitada.

Aplicaciones dentro del campo industrial

Sus diversas propiedades los convierten en candidatos ideales para desempeñar una amplia gama de funciones. Por ejemplo, su baja conductividad térmica y eléctrica, alta porosidad, alta biocompatibilidad y bioactividad, así como su capacidad para ser funcionalizados químicamente y modular sus propiedades mecánicas, los hacen únicos.

Ingeniería Tisular y de Tejidos

Gracias a sus propiedades físicas, como su porosidad, baja densidad y alta área superficial y la capacidad de ajustar estas propiedades durante su síntesis, los aerogeles se utilizan en ingeniería tisular. Es un material capaz de modificar estas propiedades y la disponibilidad de muchos materiales para formar híbridos compatibles con tejidos vivos, estas propiedades lo hacen comportarse como un biomaterial y bioactivo capaz de usarse en ingeniería de tejidos, ya que, al ser muy compatible con los tejidos óseos de nuestro cuerpo, se recibe y acepta para trabajar conjuntamente, formando parte de los procesos que lleva a cabo el sistema óseo, también puede implementarse en recubrimientos de prótesis y sistemas de administración de medicamentos. Con el continuo avance en la síntesis de nuevos materiales y los desarrollos en ingeniería de tejidos, los aerogeles tienen un

futuro prometedor como materiales bioactivos y encuentran aplicaciones de vanguardia en la tecnología actual [7].

Aplicación Química

Para sintetizar RSAM (“Polymer-Reinforced Silica Aerogel Microspheres”), se utilizaron tanto el secado al vacío como el secado con CO₂ supercrítico. La edad de contracción volumétrica del RSAM preparado mediante el método de secado al vacío fue mucho mayor que la del método de secado con CO₂ supercrítico, lo que resultó en una densidad aparente más alta.

Debido a su hidrofobicidad superior, los RSAM preparados mediante secado con CO₂ supercrítico exhibieron una capacidad máxima de adsorción de aceite de 18,6 g/g, que es superior a la de sus homólogos de última generación. El nuevo método para producir el solvente es simple e interesante, y el RSAM resultante es confiable e hidrófobo convirtiéndolo en un método alternativo e innovador para la recolección de desechos dentro de mantos acuíferos [12].

Aplicación Industrial

Dadas sus propiedades químicas y físicas del aerogel es usado para minimizar significativamente la transmisión de calor, permitiendo una mayor eficiencia energética, lo que resulta en ahorros de costos y beneficios ambientales, apoyando así el crecimiento del mercado del aerogel, en la industria automovilística para ventanas energéticamente eficientes y además, la creciente necesidad de materiales innovadores en los sectores aeroespacial y de defensa es otro impulsor clave del mercado de este material. El aerogel es un material excelente para aplicaciones de aviación debido a su peso ligero y sus excepcionales propiedades térmicas, acústicas y de amortiguación de vibraciones. Se usa en aislamiento de aviación, sistemas criogénicos, protección térmica para vehículos de reentrada y varias aplicaciones [13].

Conclusión y recomendaciones

La investigación comparativa realizada sobre las características, productividad y aplicaciones de los tres métodos de síntesis de aerogeles a base de silicio en la industria ha culminado con resultados significativos que han superado las expectativas planteadas, logrando cumplir con éxito todos los objetivos establecidos durante el desarrollo de este proyecto. La comparativa detallada de tres métodos de síntesis ha permitido identificar al método de Secado asistido por Dióxido de Carbono como el más factible en cuanto a su productividad de acuerdo con sus costos de insumos y área superficial, así como mostrando una diferencia notablemente superior en sus propiedades fisicoquímicas frente a los otros dos métodos.

Se ha logrado una evaluación exhaustiva de los tres métodos de síntesis, identificando sus características y proporcionando una visión detallada de las propiedades de los aerogeles resultantes, se realizó con éxito una comparativa de las productividades en relación con el costo de maquinaria e insumos y el área superficial resultante de cada método planteado, permitiendo identificar el método

más factible económicamente, resaltando ventajas y desventajas de cada uno de estos. Se han identificado posibles áreas de aplicación en el sector de la medicina, química, así como en la industria, destacando las ventajas y propiedades únicas de los aerogeles que los hacen idóneos para mejorar la eficiencia y rendimiento en diversas aplicaciones prácticas. Los resultados obtenidos se espera que genere interés al avance del conocimiento científico dentro de la universidad Iberoamericana en el campo de los

aerogeles, para que de esta manera se genere una perspectiva valiosa para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas dentro del campus. La identificación detallada de las ventajas y limitaciones de los tres métodos de síntesis de aerogeles a base de silicio ha enriquecido la comprensión sobre estos materiales de alto rendimiento, resaltando la importancia de la correcta elección del método de síntesis para potenciar su eficiencia y funcionalidad en diversos sectores.

Referencias

- [1] Joã.P. Vareda, A. Lamy-Mendes, L. Durães, “A reconsideration on the definition of the term aerogel based on current drying trends”, *Microporous and Mesoporous Materials*, pp 2-12, septiembre de 2017, doi: 10.1016/j.micromeso.2017.09.016.
- [2] H. Maleki y N. Hüsing, “Current status, opportunities and challenges in catalytic and photocatalytic applications of aerogels: Environmental protection aspects”, *Appl. Catalysis B: Environmental*, vol. 221, pp. 530–555, febrero de 2018. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.08.012>
- [3] I. Smirnova y P. Gurikov, “Aerogel production: Current status, research directions, and future opportunities”, *J. Supercrit. Fluids*, vol. 134, pp. 228–233, abril de 2018. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.037>
- [4] S. J. McNeil y H. Gupta, “Emerging applications of aerogels in textiles”, *Polym. Testing*, vol. 106, p. 107426, febrero de 2022. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107426>
- [5] A. C. Pierre, *Introduction to Sol-Gel Processing*. Cham: Springer Int. Publishing, 2020. Accedido el 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38144-8>
- [6] S. Iswar et al., “Dense and strong, but superinsulating silica aerogel”, *Acta Mater.*, vol. 213, p. 116959, julio de 2021. Accedido el 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116959>
- [7] J. A. Díaz Fraile, «Aerogeles Bioactivos Para Ingeniería Tisular Ósea», Departamento de Física de la Materia Condensada Facultad de Física Universidad de Sevilla, 2017, [En línea]. Disponible: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/67952/TFG.Jos%C3%A9%20Antonio%20D%C3%ADaz%20Fraile.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20historia%20de%20los%20aerogeles,previamente%20el%20concepto%20de%20coloide.>
- [8] W. Zou, H. Bian, J. Guo, J. Xu y B. Guo, “Preparation of Titania–Silica Composite Aerogel at Atmospheric Pressure and Its Catalytic Performance in the Synthesis of Poly (Butylene Succinate)”, *Materials*, vol. 16, n.º 1996-1994, 2023, art. n.º 9.
- [9] A. M. Alattar, “Design and manufacturing of supercritical drying autoclave for aerogel production”, *Iraqi J. Phys. (IJP)*, vol. 14, n.º 31, pp. 148–160, enero de 2019. Accedido el 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.30723/ijp.v14i31.182>
- [10] L. Durães, T. Matias, R. Patrício y A. Portugal, “Silica based aerogel-like materials obtained by quick microwave drying”, *Mater. Und Werkst.*, vol. 44, n.º 5, pp. 380–385, mayo de 2013. Accedido el 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/mawe.201300140>
- [11] L. Guangwu, N. Xingyuan y L. Yangang, “Synthesis and characterization of silica aerogel and its composite materials”, en *2015 IEEE 10th Int. Conf. Nano/Micro Engineered Mol. Syst. (NEMS)*, Xi'an, China, 7–11 de abril de 2015. IEEE, 2015. Accedido el 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/nems.2015.7147399>
- [12] Z. Zhao et al., “Facile Synthesis of Polymer-Reinforced Silica Aerogel Microspheres as Robust, Hydrophobic and Recyclable Sorbents for Oil Removal from Water”, *Polymers*, vol. 15, n.º 20734360, 2023, art. n.º 17.
- [13] E. Consultancy. “Mercado de aerogel por producto (sílice, polímeros), por forma (manta, panel), por aplicación (petróleo y gas, construcción, transporte, revestimiento de alto rendimiento) y región, tendencias globales y pronóstico de 2022 a 2029.” Exactitude Consultancy. Accedido el 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://exactitudeconsultancy.com/es/reports/26554/aerogel-market/>