



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
“ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FÉ”
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**SÍNTESIS DE AEROGEL DE SÍLICE (SiO_2) MEDIANTE LOS PROCESOS SOL-GEL
Y SECADO A PRESIÓN AMBIENTE (APD)**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

LUIS ROMARIO VARGAS MARTÍNEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. RAFAEL TORRES RICÁRDEZ

EN CODIRECCIÓN DE:

DRA. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA

CUNDUACÁN, TABASCO, OCTUBRE 2024

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 16 del mes octubre del año 2024, los que suscriben Luis Romario Vargas Martínez alumna (o) del programa de Ingeniería Química con número 192D22004 respectivamente, adscritos a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor(es) de la Tesis presentada para la obtención del (título, diploma o grado según sea el caso) de Ingeniero Química y titulada **"Síntesis de aerogel de sílice (SiO_2) mediante los procesos de sol-gel y secado a presión ambiente (APD)"** dirigida por el Dr. Rafael Torres Ricárdez y la Dra. María Fernanda García Mendoza.

DECLARAMOS QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Cunduacán, Tabasco a 16 de octubre de 2024.



Luis Romario Vargas Martínez



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
GOBIERNO DEL ESTADO DE TABASCO

DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ

DIRECTORA DE LA DAIA.

DE: COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL

FECHA: 16 DE OCTUBRE DE 2024

ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL

CCP: ARCHIVO.

MEM/CET/320/ID320/2024

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

"Síntesis de aerogel de sílice (SiO_2) mediante los procesos de sol-gel y secado a presión ambiente (APD)."

Desarrollado por el C. LUIS ROMARIO VARGAS MARTÍNEZ de la Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA bajo la modalidad de "Tesis", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA

DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERÁZ

Revisor

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ

Revisor

DRA. MA. GUADALUPE RIVERA

RUEDAS

Revisor

DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES

Revisor

DR. BRAYAN LEONARDO PÉREZ

ESCOBAR

Revisor

DR. RAFAEL TORRES RICARDEZ

Director de Trabajo Recepcional

M.C. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA

Co-Director de Trabajo Recepcional

Miembro CUMEX desde 2008

Consortio de
Universidades
Mexicanas

UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cuauacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda

C.P. 86690 Cuauacán, Tabasco

Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752

direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
GOBIERNO DEL ESTADO DE TABASCO

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/1042/2024

FECHA: 25 de octubre de 2024

ASUNTO: Autorización de Impresión
Definitiva

C. LUIS ROMARIO VARGAS MARTÍNEZ

PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por el DR. RAFAEL TORRES RICARDEZ y la M.C. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA, titulado:

"Síntesis de aerogel de sílice (SiO_2) mediante los procesos de sol-gel y secado a presión ambiente (APD)."

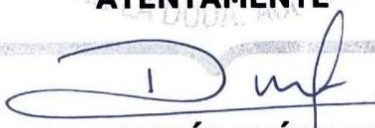
Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE


DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA QUÍMICA-320
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008
Consortio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P. 86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 16 de octubre de 2024

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **“Síntesis de aerogel de sílice (SiO_2) mediante los procesos de sol-gel y secado a presión ambiente (APD)”**.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABOLADORES



Luis Romario Vargas Martínez

Dr. Rafael Torres Ricárdez

Dra. María Fernanda García
Mendoza

DEDICATORIA

A mí amada madre, Isabel, por apoyarme y darme todo de sí para poder cumplir mis metas, sin todos tus preciados sacrificios no estaría dónde estoy, ni aspiraría a ir a donde voy. Te amo.

A mí abuela y mi padre por su apoyo constante, el cuál me ha permitido desarrollarme cómodamente en los diferentes ámbitos de la vida.

A mi hermano, para que mi ejemplo te llene de ambición y convicción, y logres el futuro que tanto deseo para ti.

A toda mi familia, quienes llenan mis días de alegría y están siempre presentes para apoyarme con todo incondicionalmente.

Con amor, Roma.

AGRADECIMIENTOS

Primero, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Rafael Torres Ricárdez, mi director de tesis, por su invaluable orientación, apoyo y paciencia a lo largo de este proyecto. Su conocimiento, asesoramiento y estímulo continuo han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Agradezco también a los doctores Germán Pérez Hernández y María Fernanda García Mendoza por su apoyo adicional y por proporcionar valiosos comentarios y sugerencias que mejoraron significativamente este trabajo.

Quisiera extender mi gratitud al comité de revisores por su tiempo, esfuerzo y sus críticas constructivas, que contribuyeron en gran medida a la calidad final de esta tesis. Sus aportaciones han sido muy apreciadas y han enriquecido el presente trabajo.

Un agradecimiento especial va dirigido a mis padres y mi abuela por ser los pilares de mi sustento académico a través de estos años. Así mismo agradezco a todos mis familiares y amigos que estuvieron presentes durante mi desarrollo académico, quienes brindaron momentos de felicidad e hicieron de esta etapa una mejor experiencia. No hay palabras para describir el amor y gratitud que siento por todos ustedes.

Finalmente, agradezco a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura y al Laboratorio de Ingeniería de Superficies y Energías Renovables, por facilitarme la sabiduría y los recursos para cursar mi licenciatura, y por hacer posible el desarrollo de esta experimentación e investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1.1 Antecedentes	5
1.2 Justificación	7
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Pregunta de investigación	8
1.5 Hipótesis	8
1.6 Estructura de la tesis	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Aerogeles	9
2.2 Tipos de aerogel	9
2.2.2 Aerogeles basados en su método de preparación	9
2.2.3 Inorgánicos	10
2.2.4 Orgánicos	11
2.3 Elaboración de aerogeles de sílice	12
2.3.1 Sol-gel	12
2.3.2 Técnicas de secado	13
2.4 Aplicaciones	14
CAPÍTULO III. DISEÑO EXPERIMENTAL	15
3.1 Proceso sol-gel	15
3.1.1 Preparación de la solución	15
3.1.2 Obtención del gel	17
3.2 Hidrólisis	18
3.3 Sustitución del solvente	19
3.4 Secado a presión ambiente (APD)	20
3.4.1 Tratamiento térmico	20
3.5 Caracterización del SiO ₂	20
3.5.1 Difracción de rayos X	21

3.5.2 Espectroscopia Uv-Vis.....	21
3.5.3 Análisis termogravimétrico (TGA)	22
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	23
4.1 Síntesis de SiO ₂	23
4.1.1 pH de las soluciones precursoras	23
4.1.2 Obtención de los geles	24
4.1.4 Geles secados mediante sustitución de solvente	24
4.1.5 Aerogel de SiO ₂	25
4.2 Análisis estructural	25
4.3 Propiedades ópticas	26
4.3.1 Cálculo de la banda prohibida	27
4.4 Propiedades térmicas	29
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	30
RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
ANEXOS	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Amberlita (Amberlyst®) resina de intercambio catiónico.	16
Figura 3.2. Elaboración de la solución sol.	16
Figura 3.3. Horno de secado ECOSHEL 9023A.	17
Figura 3.4. Gelificación de la solución dispuesta en caja Petri.	18
Figura 3.5. Gelificación de la solución dispuesta en vasos de precipitado.	18
Figura 3.6. Proceso de hidrólisis del gel.	19
Figura 3.7. Proceso de sustitución de solvente.	20
Figura 3.8. Tratamiento térmico para secado a presión ambiente.	20
Figura 3.9. Difractómetro de rayos X Bruker Advance Eco.	22
Figura 3.10. Espectrofotómetro Shimadzu Uv-2600.	23
Figura 3.11. Analizador gravimétrico Setaram LABSYS evo DTA/DSC.	23
Figura 4.1. Formación de geles de las muestras.	25
Figura 4.2. Solidificación de la muestra 2.	25
Figura 4.3. Geles secados mediante química húmeda.	26
Figura 4.4. SiO ₂ sintetizado mediante química húmeda y secado a presión ambiente.	26
Figura 4.5. Espectro de difracción de rayos X.	27
Figura 4.6. Espectro de transmitancia UV-VIS de las muestras de SiO ₂	28
Figura 4.7. Cálculo de la banda prohibida del SiO ₂ . (a) Muestra 1, (b) Muestra 2, (c) Muestra 3, (d) Muestra 4.	29
Figura 4.8. Curva termogravimétrica de la muestra de SiO ₂	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Proporciones de los reactivos usados en la elaboración de las soluciones precursoras.	16
Tabla 3.2. Volúmenes de las soluciones empleadas para la mezcla solvente para las distintas muestras.	20
Tabla 4.1. Valores de pH sin modificar de las soluciones precursoras.	24
Tabla 4.2. Valores de pH finales de las soluciones precursoras.	24

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla la síntesis de aerogeles de sílice, mediante proceso sol-gel, secado a presión atmosférica y temperatura ambiente. La metodología incluye la preparación de una solución con silicato de sodio, agua y amberlita, seguido de la obtención del gel, hidrólisis para fortalecerlo, sustitución del solvente y secado a presión ambiente. Se realizaron pruebas para caracterizar las propiedades del SiO_2 sintetizado, utilizando las técnicas de rayos X, espectroscopia UV-Vis y Análisis Termogravimétrico. El material obtenido no presenta estructura cristalina, indicando características amorfas. Las propiedades ópticas muestran que la banda prohibida del material varía de 3.7 a 4.7 eV, típicas de un semiconductor. Térmicamente, la muestra pierde masa gradualmente entre 200 y 800 °C, pero se mantiene estable hasta los 800 °C.

PALABRAS CLAVE

Aerogeles de sílice, sol-gel, SiO_2 , banda prohibida, semiconductor.

ABSTRACT

This paper develops the synthesis of silica aerogels using a sol-gel process, with drying at atmospheric pressure and room temperature. The methodology involves preparing a solution of sodium silicate, water, and amberlite, followed by gel formation, hydrolysis to strengthen the gel, solvent exchange, and drying at ambient pressure. Characterization tests were conducted to analyze the properties of the synthesized SiO_2 using X-ray techniques, UV-Vis spectroscopy, and Thermogravimetric Analysis. The resulting material shows no crystalline structure, indicating amorphous characteristics. The optical properties reveal that the band gap of the material varies from 3.7 to 4.7 eV, which is typical for a semiconductor. Thermally, the sample gradually loses mass between 200 and 800 °C but remains stable up to 800 °C.

KEYWORDS

Silica aerogels, sol-gel, SiO_2 , band gap, semiconductor.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los materiales avanzados han desempeñado un papel fundamental en diversas áreas de la ciencia y la tecnología. Entre estos materiales, los aerogeles han emergido como una clase única y fascinante debido a sus propiedades excepcionales y su amplio rango de aplicaciones. Los aerogeles son materiales extremadamente porosos, en general de sílice, alúmina, circonita, óxidos de estaño o wolframio o mezclas de esos óxidos. Debido a su gran porosidad, de hasta un 99%, y a su gran superficie interna, los aerogeles pueden utilizarse como catalizadores activos, sustratos catalíticos, adsorbentes, rellenos, agentes de refuerzo, pigmentos y agentes gelificantes. (Villegas, 1990).

Uno de los aerogeles más estudiados es el aerogel de sílice, que se obtiene a través de la técnica de sol-gel. La técnica de sol-gel es un proceso versátil y eficiente para la síntesis de materiales inorgánicos, permitiendo la formación de productos con una amplia gama de estructuras y propiedades controladas a nivel nanométrico. Dicha técnica se define como una ruta coloidal utilizada para sintetizar cerámicos con una fase intermedia, incluyendo un estado sol-gel. (Bautista, 2008).

Con el paso del tiempo, se han desarrollado diferentes enfoques para la síntesis de aerogeles de sílice por la técnica de sol-gel. Estos enfoques han evolucionado desde condiciones de procesamiento rigurosas y costosas hasta condiciones más suaves y ambientales, con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Las condiciones ambientales incluyen temperaturas y presiones moderadas, eliminando la necesidad de equipos de alta tecnología y energía intensiva. Esta evolución en las condiciones de síntesis ha abierto nuevas oportunidades para la fabricación escalable y sostenible de aerogeles de sílice con propiedades personalizadas.

El presente trabajo tiene como objetivo sintetizar aerogeles de sílice utilizando la técnica de sol-gel bajo condiciones ambientales y explorar las propiedades resultantes de los materiales obtenidos. Se analizarán los efectos de las variables

de síntesis en la estructura, morfología y propiedades de los aerogeles de sílice, con un enfoque particular en su aplicabilidad como aislante térmico.

1.1 Antecedentes

Los aerogeles de sílice comúnmente requieren altas presiones para ser sintetizados (30-100 atm), empleando técnicas como el secado supercrítico, que consiste en llevar el líquido contenido en el gel por encima de su punto crítico y deshidratando el hidrogel. Sin embargo, el proceso de secado requiere altas cantidades de energía y resulta ser peligroso de manejar. (Shi *et al.*, 2006). Debido a estas desventajas, surge la necesidad de efectuar una síntesis de aerogel de sílice a condiciones ambientales, cuidando que las propiedades resulten de utilidad para su desempeño como aislante térmico en el material en el cual va a fungir como aditivo.

En el año 2018, Zhang *et al.*, lograron la síntesis de micro esferas de aerogel de sílice libres de surfactante, que en principio actúa como emulsionante. En su trabajo desarrollaron un método mediante secado a presión ambiental (APD) sin aplicar tenso activos ni agitación mecánica, para ello emplearon como percusor una solución de etanol de sílice parcialmente hidrolizada y parcialmente condensada, n-heptano como solvente y gas amoníaco soluble en agua como catalizador. Inicialmente se diseñó una solución acuosa de amoníaco como catalizador para las reacciones de hidrólisis y condensación, sin embargo se confirmó que el gas amoníaco (NH_3) era factible y más eficaz. Después de un proceso sol-gel y un proceso APD, se obtuvieron micro esferas de aerogel en forma de polvo blanco con una densidad de empaquetamiento que varió de 62 mg/cm^3 a 230 mg/cm^3 para diferentes muestras.

Posteriormente, Delvasto *et al.* (2019) sintetizaron aerogeles de nanosílice para aplicación en recubrimientos superaislantes, esto partiendo de residuos agroindustriales (cascarilla de arroz). Para la obtención de estas partículas de nanosílice y aerogeles de sílice llevaron a cabo un tratamiento termoquímico, una síntesis sol-gel y un secado supercrítico. Se obtuvieron dos precursores silíceos de silicato de sodio (SS), el primero SS1 (por calcinación de la CA) y el SS2

(directamente de la CA mediante un tratamiento químico). Se alcanzaron hidrogeles síliceos a partir de la cascarilla de arroz con 14 días de gelificación y con una resistencia mecánica capaz de soportar el secado supercrítico y con una apariencia translúcida. Se hizo una combinación de tratamientos hidrotermales y de sol-gel que permitieron un mayor control de la porosidad final. De esta forma, se lograron aerogeles síliceos con una densidad de 0.08 g/cm^3 y un volumen de poros del 96%, comparable a las aerogeles obtenidas por precursores tóxicos y costosos como el tetrametil ortosilicato (TMOS) y tetraetoxisilano (TEOS). Tras recubrir las placas con el material sintetizado se redujo la conductividad térmica en 45.8%, comprobando así su propiedad de aislante térmico.

Por otra parte, Du *et al.* (2019) fueron capaces de sintetizar aerogel de sílice mediante APD, en este caso sin efectuar intercambio de solventes ni modificaciones en la superficie. Para ello reforzaron el material con fibras de mullita (SAC). Los resultados mostraron que los SAC con un contenido de volumen de fibra de 5.7% exhibieron la conductividad térmica más baja (0.101 y $0.0403 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a 1100°C y temperatura ambiente, respectivamente), el ángulo de contacto más alto (158.2°) y compresión, con lo cual se consideró el material como un aislante térmico eficaz.

Otra ruta para la preparación de aerogel de sílice a temperatura ambiente fue propuesta por Zhao *et al.* (2021), con la ventaja de ahorrar tiempo y empleando TEOS como precursor. El polvo de aerogel de sílice súper hidrofóbico aislante térmico se sintetizó mediante la combinación de una reacción sol-gel de dos pasos con un proceso rápido de secado a presión ambiental. El polvo de aerogel de sílice obtenido mediante esta ruta exhibe excelentes propiedades, como baja densidad aparente (0.212 g/cm^3) y conductividad térmica (0.053 W/mK), así como una alta área de superficie BET ($769.86 \text{ m}^2/\text{g}$) y ángulo de contacto con el agua (149.0°).

De igual forma, Lamy-Mendes *et al.* (2021), reportaron la aplicación de aerogel de sílice en materiales de construcción para hacerlos aislantes térmicos, haciendo énfasis en las propiedades del aerogel de sílice, particularmente en su translucidez y su densidad y conductividad térmica extremadamente bajas. Otros reportes de la aplicación de aerogel de sílice como aislante térmico en materiales de construcción

son publicados por Alves et al. (2022), que emplean aerogel de sílice con gaúcho reciclado como una alternativa sustentable para aislamiento térmico en construcciones y edificios. Los resultados mostraron que sus propiedades físicas, morfológicas, térmicas y mecánicas eran relevantes, dando lugar a compuestos con diferentes propiedades/desempeño. Los valores de densidad aparente obtenidos fueron satisfactorios, hasta 474 kg/m^3 , y conductividad térmica tan baja como 0.055 W/mK , que indicaba que era un material idóneo para aplicaciones de aislamiento térmico.

1.2 Justificación

El presente trabajo se enfoca en la síntesis de aerogel de sílice mediante el proceso de sol-gel y secado a presión ambiental.

El motivo principal del desarrollo de éste tema se debe a la búsqueda de una ruta para la síntesis del material considerando las condiciones ambientales, ya que el uso de técnicas como el secado a presiones y temperaturas supercríticas demanda mayores requerimientos. Es por esto que mediante un secado a presión ambiental resulta más factible. Por su parte, los materiales, reactivos y equipos a emplearse siguiendo esta ruta son de fácil acceso.

Así bien, una vez obtenido el aerogel de sílice mediante química húmeda, el objetivo es estudiar sus propiedades físicas y químicas para determinar si tiene propiedades de un semiconductor, y por ende, de aislante térmico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Sintetizar SiO_2 mediante la técnica de química húmeda en condiciones experimentales de presión y temperatura ambiente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de resina de intercambio catiónico para alcanzar el pH adecuado en la síntesis.
- Establecer las condiciones de la solución sol mediante cambios de temperatura para alcanzar la gelificación.
- Caracterizar material sintetizado mediante Uv-Vis, rayos X, TGA para conocer sus propiedades ópticas, estructuras y comportamiento térmico.

1.4 Pregunta de investigación

¿Será efectiva la metodología utilizada para la síntesis del aerogel de sílice bajo condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente?

1.5 Hipótesis

La metodología empleada para la síntesis del aerogel de sílice es factible para obtener un material en condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente del recinto.

1.6 Estructura de la tesis

La presente tesis se estructura en cinco capítulos. El primer capítulo, se presenta la introducción, donde se plantean los objetivos y la justificación del estudio. El segundo es el marco teórico, que ofrece una revisión de la literatura relevante. El tercer capítulo, diseño experimental, describe la metodología utilizada. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos. Finalmente, el quinto capítulo expone las conclusiones.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Aerogeles

El término “aerogel” fue acuñado por primera vez por el ingeniero Samuel S. Kistler en 1932, para así hacer referencia a geles en los cuales el líquido había sido remplazado por un gas sin destruir la red sólida del gel. Para elaborar el material, Kistler aplicó una técnica llamada secado supercrítico. Tiempo después se establecieron nuevas rutas y precursores con los cuales procesar dicho material (Aegerter *et al.*, 2011).

Se puede definir al aerogel como un material poroso de tipo sintético, donde el componente líquido que forma parte del gel es sustituido por gas, generalmente aire. Estos materiales cuentan con fascinantes propiedades, entre las que destaca su conductividad térmica ($\sim 13 \text{ mW/mK}$), que es mucho menor que otros materiales aislantes comerciales. Dicha propiedad es propiciada por su estructura altamente porosa ($\sim 99.8\%$ porosos), igual cuenta con densidad, constante dieléctrica e índice de refracción extremadamente bajos. (Azum *et al.*, 2021).

2.2 Tipos de aerogel

Los aerogeles se clasifican según su apariencia, método de preparación, tipo de microestructuras y estructura química. Debido a la relevancia se describen a continuación algunos de estas. Cabe resaltar que estos se pueden presentar en forma monolítica, de polvo y películas.

2.2.2 Aerogeles basados en su método de preparación

Xerogel

Estos son definidos como estructuras porosas obtenidas mediante el secado por evaporación de un gel (Yamasaki *et al.*, 2019).

La peculiaridad de este tipo de aerogel recae en que se obtiene mediante una metodología de secado distinta a la convencional. A diferencia de los aerogeles comunes, que son obtenidos mediante secado supercrítico, los xerogeles llevan a cabo esta etapa de secado a condiciones ambientales (Khan *et al.*, 2024). Las características de los xerogeles van a depender fuertemente del precursor, el medio disolvente y las condiciones del secado, aunque estas mismas se pueden controlar tanto en la fase de síntesis como en la de secado, pero su porosidad sigue siendo menor que la de los aerogeles de los mismos materiales (Pramanik, 2019). Una ventaja que podemos encontrar es que en mayor parte de los casos, las propiedades mecánicas de los xerogeles son menores que la de los aerogeles debido a su menor porosidad y por ende, una mayor densidad aparente (Mariana, 2022).

Cryogel

Los criogeles son redes de gel creadas por polimerización a temperaturas bajo cero. La polimerización se da principalmente en las áreas que no se han congelado, mientras que los cristales de hielo generados van formando los poros. Al finalizar la polimerización, y tras descongelar los criogeles, se desarrollan supermacroporos en la estructura del criogel. (Bakhshpour, 2019).

La composición química del criogel es crucial, pues determina su biocompatibilidad y degradabilidad, y también influye en sus propiedades mecánicas y térmicas. La porosidad y el grado de reticulación afectan principalmente las propiedades mecánicas, mientras que la reticulación también influye en la biocompatibilidad y degradabilidad (Jones *et al.*, 2021).

2.2.3 Inorgánicos

Aerogel de sílice

Materiales que destacan por su alta porosidad, en el cual el componente principal es óxido de silicio (SiO_2). Para producirlo tradicionalmente se consta de un proceso

sol-gel para la obtención de un hidrogel, al cual posteriormente requiere de un secado supercrítico.

En su mayoría, los aerogeles de sílice industriales cuentan con propiedades uniformes, tales como: densidades envolventes o aparentes de $\sim 0,120 \text{ g/cm}^3$ correspondientes a porosidades de $\sim 95\%$, altos volúmenes de mesoporos, áreas de superficie de $700\text{-}900 \text{ m}^2/\text{g}$ y conductividades térmicas de alrededor de 15 mW/mK . Los valores mencionados se deben a su estructura de collar de perlas, la cual es altamente porosa e intrincada, sin embargo, esta misma característica limita la resistencia mecánica (Mazrouei-Sebdani *et al.*, 2021).

Aerogeles de óxidos metálicos

Estos aerogeles, que incluyen óxidos como la alúmina (AlO), titania (TiO) y circonia (ZrO), se distinguen por su alta estabilidad térmica y química, derivada de la estructura cristalina de los iones inorgánicos presentes en su composición.

Investigadores han experimentado con diversos métodos y categorías de compuestos, lo que llevó al descubrimiento de que los compuestos de aerogel a base de óxido metálico, en particular los que utilizan sílice, exhiben una mayor estabilidad térmica (Reyhani *et al.*, 2021).

2.2.4 Orgánicos

Aerogeles de carbono

Se trata de materiales obtenidos partiendo de una policondesación mediante sol-gel de algunos compuestos orgánicos, tales como el formaldehído.

Los aerogeles de carbono generalmente poseen estructuras en red tridimensionales que están interconectadas por nanopartículas primarias. Sus propiedades estructurales microporosas están relacionadas con la estructura intrapartícula, mientras que la morfología interpartícula gobierna el desarrollo de mesoporos y macroporos (Lee & Park, 2020).

Aerogeles de polisacáridos

Los aerogeles de polisacáridos son obtenidos a partir de biopolímeros naturales como celulosa, alginato, quitina, y otros polisacáridos. Estos aerogeles se destacan por su biodegradabilidad y biocompatibilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones en medicina, cosmética, y farmacéutica, así como en tecnologías de separación y purificación debido a su gran superficie específica y baja densidad. (Mavelil-Sam *et al.*, 2018), (Tawiah *et al.*, 2023).

2.3 Elaboración de aerogeles de sílice

La elaboración de los aerogeles de sílice consta de dos etapas cruciales, la primera de ellas es el proceso sol-gel, en donde un precursor de sílice se hidroliza y condensa para formar una red de gel. La segunda etapa se denomina etapa de secado, en la cual el gel obtenido en la primera etapa se somete a un secado supercrítico, que elimina el solvente sin colapsar la estructura porosa.

2.3.1 Sol-gel

Esta técnica es el primer paso para la elaboración del aerogel de sílice, primero se prepara el sol empleando un precursor que contenga silicio, y posteriormente se obtiene el gel una vez que las partículas coloidales se conectan y forman la red tridimensional.

Cuando el sol alcanza la etapa de gel, todavía quedan varios grupos alcóxido sin reaccionar en la columna de sílice del gel. Debe haber suficiente tiempo para fortalecer la red de sílice mediante la gestión del pH, la concentración y el contenido de agua de la solución superpuesta. La estructura del gel puede cambiar debido a varios factores, como el envejecimiento y la disolución de partículas microscópicas en otras más grandes. Para eliminar los restos de agua de los poros se debe limpiar el gel con etanol y heptano una vez haya envejecido (Rashid *et al.*, 2023).

Precursores para el proceso sol-gel

Debido a los recientes avances en la química sol-gel, los alcóxidos de silicio son ahora los precursores iniciales para preparar aerogeles de sílice. Los dos alcóxidos de silicio más frecuentes son el ortosilicato de tetraetilo (TEOS, $\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_4$) y el ortosilicato de tetrametilo (TMOS, $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$). Se pueden lograr diferentes características de gel utilizando diversos alcóxidos y compuestos de silicio que incorporan grupos funcionales orgánicos (Khan *et al.*, 2024).

Además, el silicato de sodio, conocido como “water glass”, es frecuentemente empleado como precursor en la fabricación de aerogeles de sílice. Este compuesto, formado por una mezcla de óxidos de sodio y sílice disueltos en agua, es muy soluble y proporciona una fuente abundante de sílice para el proceso sol-gel.

2.3.2 Técnicas de secado

Si bien la técnica sol-gel es una constante para la producción de aerogeles, es el tipo de secado el que brinda una diferencia a la síntesis del material, ya que dependiendo de una u otra se pueden obtener materiales con mayor o menor porosidad y densidad, así como un aumento en los costos a causa de los equipos involucrados en el proceso.

Secado supercrítico

Consiste en extraer la humedad de los materiales mediante un fluido en condiciones por encima de su punto crítico, sin alterar su estructura.

Secado a presión ambiente (APD)

Elimina la humedad de los materiales mediante la aplicación de calor a una presión atmosférica normal.

Secado subcrítico

Emplea un fluido que se encuentra por debajo de su punto crítico para eliminar la humedad a presiones y temperaturas moderadas.

2.4 Aplicaciones

La baja densidad y alta porosidad son cualidades que vuelven estos materiales los candidatos ideales para su uso como aislantes térmicos, principalmente en edificios y construcciones. Es sabido que en los últimos años es obligatoria la reducción de las emisiones de CO_2 , para ello el aislamiento térmico en edificios juega un papel clave, ya que al reducir la transferencia de calor entre las superficies de los espacios habitados se logra una eficiencia energética, así como también la reducción de la huella de carbono generada por el consumo energético de las viviendas.

En la rama de la ingeniería química destaca por ser útil en aplicaciones catalíticas, fotocatalíticas, procesos de adsorción y protección ambiental.

El mayor interés de la industria es el de diseñar materiales innovadores en cuanto a catalizadores sólidos, con un especial interés en emplear aerogel como soporte de catalizador. Si bien esto se debe a sus propiedades estructurales, es la flexibilidad brindada por la técnica de síntesis sol-gel la que da la versatilidad, ya que esta permite mayor control de la textura, composición y homogeneidad desde niveles moleculares (Maleki & Hüsing, 2018). Por otra parte, la aplicación de los aerogeles para la adsorción o captura de carbono es un campo relativamente novedoso y tiene como objetivo limpiar sus gases de combustión y establecer tecnologías de energía limpia con cero emisiones de CO_2 . Aunque el rendimiento del aerogel para lograr erradicar las emisiones de CO_2 al medio ambiente es prometedor, el desarrollo del material también suele encontrarse algunos inconvenientes de los aerogeles, como el proceso de secado, la debilidad de su estructura mecánica y el costo de procesamiento (Karami, 2018).

CAPÍTULO III. DISEÑO EXPERIMENTAL

La síntesis del aerogel se realizó utilizando la metodología propuesta por Shi et al. (2006), mediante un proceso sol-gel y un secado a condiciones de temperatura y presión ambiente, con silicato de sodio como precursor.

3.1 Proceso sol-gel

Este proceso abarca las etapas de elaboración de la solución precursora y obtención del gel.

3.1.1 Preparación de la solución

Para elaborar la solución se utilizó silicato de sodio ($\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}_3$) grado reactivo (Sigma-Aldrich), agua desionizada y amberlita (Amberlyst® 15, Fig. 3.1) en forma de hidrogeno (Supelco) como resina de intercambio catiónico. La mezcla de silicato de sodio y agua desionizada utilizada fue con una proporción de volumen 1:4, diluyendo y posteriormente agregando la resina de intercambio catiónico (Fig. 3.2).

La metodología utilizada no sugiere una cantidad de amberlita para regular el pH del proceso de sol, por lo que fue necesario variar la masa de la amberlita, con la finalidad de alcanzar el pH adecuado en la síntesis. Se elaboraron cuatro muestras variando estos parámetros, la tabla 3.1 indica las cantidades empleadas.

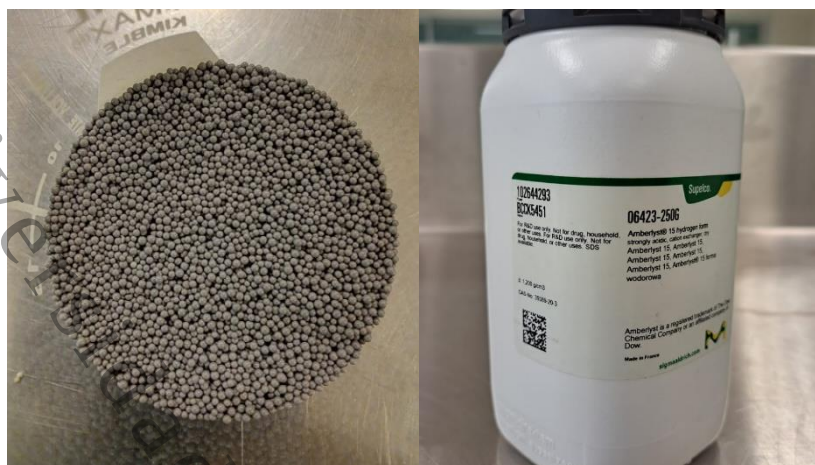


Figura 3.1. Amberlita (Amberlyst®) resina de intercambio catiónico.

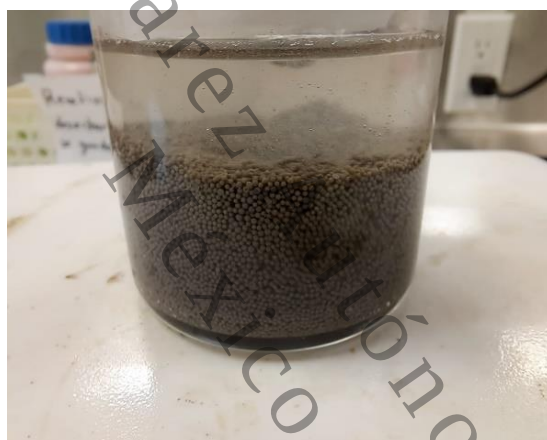


Figura 3.2. Elaboración de la solución sol.

Tabla 3.1. Proporciones de los reactivos usados en la elaboración de las soluciones precursoras.

Muestra	Silicato de sodio (mL)	Agua desionizada (mL)	Amberlita (g)
1	5	20	6
2	5	20	5
3	5	20	5
4	10	40	8.6

En las primeras tres muestras se usaron soluciones de 25 mL con 6, 5 y 5 g de amberlita respectivamente. Para estas soluciones la diferencia reside en la etapa de gelación.

Para la muestra 4 se usó mayor volumen de solución con la finalidad de determinar estructura del aerogel que se espera obtener.

Es ideal que estas soluciones tengan un pH de 5. En el caso de la muestra 1, se empleó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) para elevar el valor del pH. Las soluciones fueron agitadas durante 1 minuto empleando un agitador magnético.

En caso de obtener un pH menor, se neutraliza con una solución de NaOH 0.1 N.

3.1.2 Obtención del gel

Las muestras 1 y 2 fueron dispersas en cajas de Petri. La muestra 1 se llevó al horno de secado ECOSHEL 9023A (Fig. 3.3 y 3.4), a una temperatura de 50 °C durante 20 min. La muestra 2, se dejó secar a temperatura ambiente por 24 h.



Figura 3.3. Horno de secado ECOSHEL 9023A.



Figura 3.4. Gelificación de la solución dispuesta en caja Petri.

Para el caso de las muestras 3 y 4, estas fueron depositadas en vasos de precipitados y llevados al horno de secado a 50 °C por 20 min (Fig 3.5).



Figura 3.5. Gelificación de la solución dispuesta en vasos de precipitado.

3.2 Hidrólisis

Una vez obtenidos los geles de las muestras 1, 3 y 4, se sometieron a hidrólisis por 24 h a temperatura ambiente inmersos en soluciones de 50 % volumen de etanol

(99.5%, J. T. Baker) y agua desionizada (Fig. 3.6), esto con la finalidad de fortalecer la red del gel. Posterior a la hidrolisis, se dejaron reposando a temperatura ambiente durante 24 h.



Figura 3.6. Proceso de hidrolisis de los geles.

3.3 Sustitución del solvente

Para la etapa de secado mediante química húmeda, los geles se sumergieron en mezclas de etanol (99.5%, J. T. Baker), heptano y clorotrimetileno, con una proporción 1:1:1 (Fig. 3.7). Las cantidades de los solventes empleados para cada muestra aparecen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Volúmenes de las soluciones empleadas para la mezcla solvente para las distintas muestras.

Muestra	Etanol (mL)	Heptano (mL)	Clorotrimetileno (mL)
1	20	20	20
2	---	---	---
3	30	30	30
4	50	50	50

Para el secado de las muestras 3 y 4 se agregó más solvente para estudiar el efecto que causa este aumento en SiO_2 sintetizado.



Figura 3.7. Proceso de sustitución de solvente.

3.4 Secado a presión ambiente (APD)

3.4.1 Tratamiento térmico

Las muestras 1, 3 y 4 fueron sometidas a tratamiento térmico para eliminar los residuos de solvente en los geles. Este proceso se llevó a cabo en el horno de secado a temperatura de 180°C durante un periodo de 2 h (Fig. 3.8).



Figura 3.8. Tratamiento térmico para secado a presión ambiente.

3.5 Caracterización del SiO₂

Se realizaron pruebas para determinar las propiedades estructurales, ópticas y térmicas del SiO₂ sintetizado.

3.5.1 Difracción de rayos X

El análisis de la estructura del material fue llevado a cabo mediante la técnica de difracción de rayos X en un difractómetro de rayos X Bruker Advance Eco (Fig. 3.9).



Figura 3.9. Difractómetro de rayos X Bruker Advance Eco.

3.5.2 Espectroscopia Uv-Vis

Para determinar las propiedades ópticas se realizó espectroscopia UV-Vis con esfera de integración en un espectrofotómetro Shimadzu Uv-2600 (Fig. 3.10).



Figura 3.10. Espectrofotómetro Shimadzu Uv-2600.

3.5.3 Análisis termogravimétrico (TGA)

Para las propiedades térmicas se llevó a cabo un análisis termogravimétrico con un analizador gravimétrico Setaram LABSYS evo DTA/DSC (Fig. 3.11), en un rango de temperatura de 100 a 1000 °C.

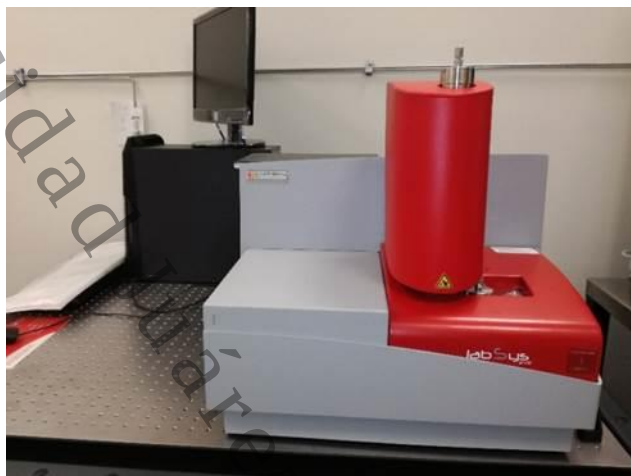


Figura 3.11. Analizador gravimétrico Setaram LABSYS evo DTA/DSC.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 Síntesis de SiO₂

4.1.1 pH de las soluciones precursoras

En la tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos para las soluciones sol.

Tabla 4.1. Valores de pH sin modificar de las soluciones precursoras.

Muestra	pH
1	1.67
2	5.43
3	5.43
4	2.9

Debido a la cantidad de amberlita añadida a las muestras 1 y 4, el pH de las soluciones se encuentra por debajo de lo ideal requerido para su posterior proceso de gelificación. El pH de estas soluciones se modificó empleando una solución de NaOH a 1 N.

En la tabla 4.2 se encuentran los valores de pH después de aumentarlo con NaOH.

Tabla 4.2. Valores de pH finales de las soluciones precursoras.

Muestra	pH
1	5.57
2	5.43
3	5.43
4	5.5

4.1.2 Obtención de los geles

Las muestras 1, 3 y 4 se formaron en geles tras concluir los procesos de maduración (Fig. 4.1).

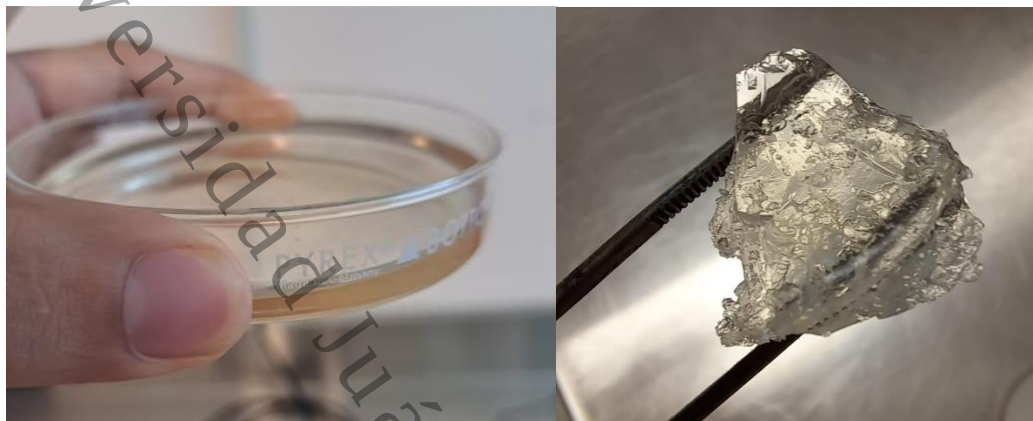


Figura 4.1. Formación de geles de las muestras.

La muestra 2 solidificó a temperatura ambiente adquiriendo un aspecto similar al vidrio (Fig. 4.2).



Figura 4.2. Solidificación de la muestra 2.

4.1.4 Geles secados mediante sustitución de solvente

El agua dentro de los geles fue sustituida por completo de los hidrogeles, quedando únicamente restos de la mezcla etanol, heptano y clorotrimetileno (Fig. 4.3):

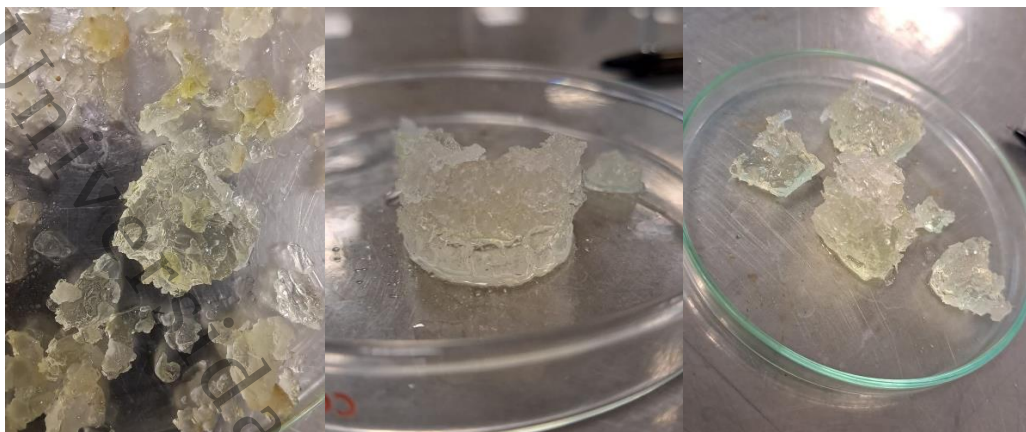


Figura 4.3. Geles secados mediante química húmeda.

4.1.5 Aerogel de SiO_2

Una vez llevados a tratamiento térmico se eliminaron los residuos de la mezcla de sustitución, resultando en un material sólido (Fig. 4.4). El sólido resultante fue pulverizado.



Figura 4.4. SiO_2 sintetizado mediante química húmeda y secado a presión ambiente.

4.2 Análisis estructural

Los espectros de rayos X se obtuvieron graficando la intensidad con respecto a los grados de difracción (Fig. 4.5). Para todas las muestras se obtuvo el mismo espectro.

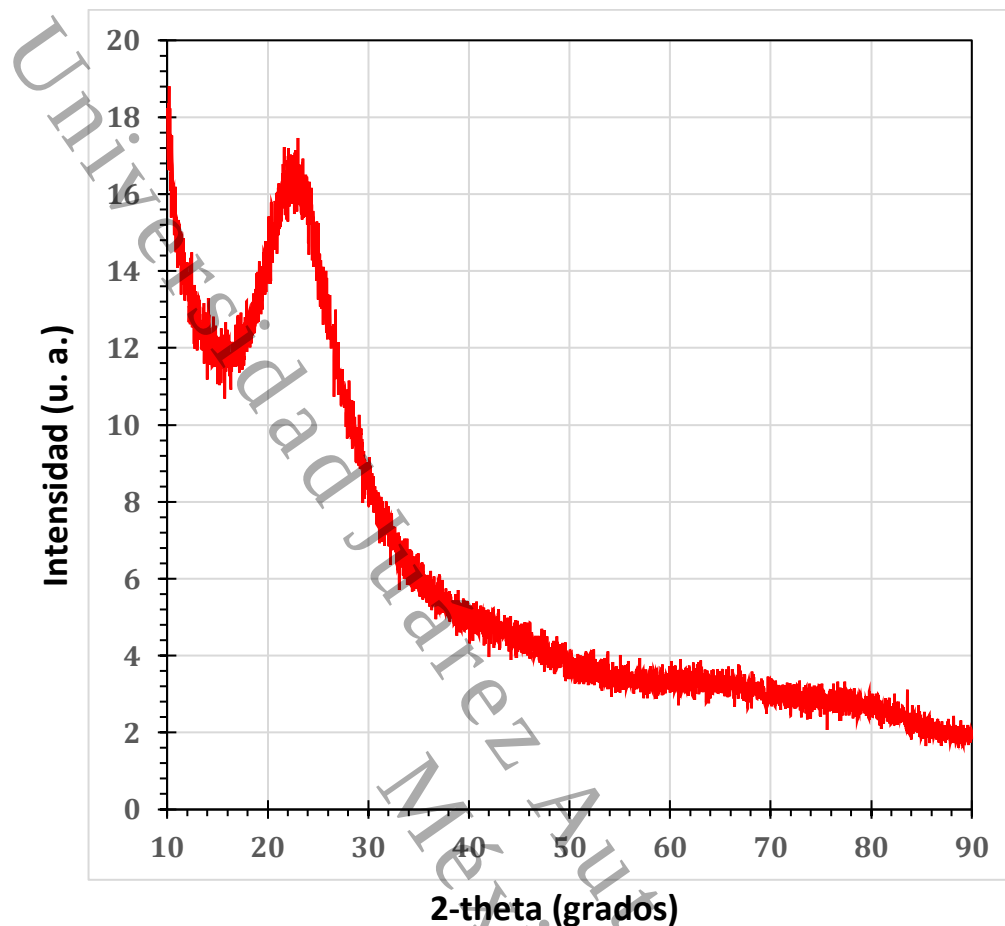


Figura 4.5. Espectro de difracción de rayos x.

Los espectros indican que el material sintetizado no presenta estructura cristalina, debido principalmente a la temperatura durante el proceso. En el rango de 20 a 30°, se observa un vértice que corresponde al patrón de alineación del equipo de rayo X.

4.3 Propiedades ópticas

Se graficó el porcentaje de transmitancia con respecto a la longitud de onda para cada una de las muestras (Fig. 4.6). El comportamiento que siguen las curvas para los cuatro casos es propio de los materiales semiconductores.

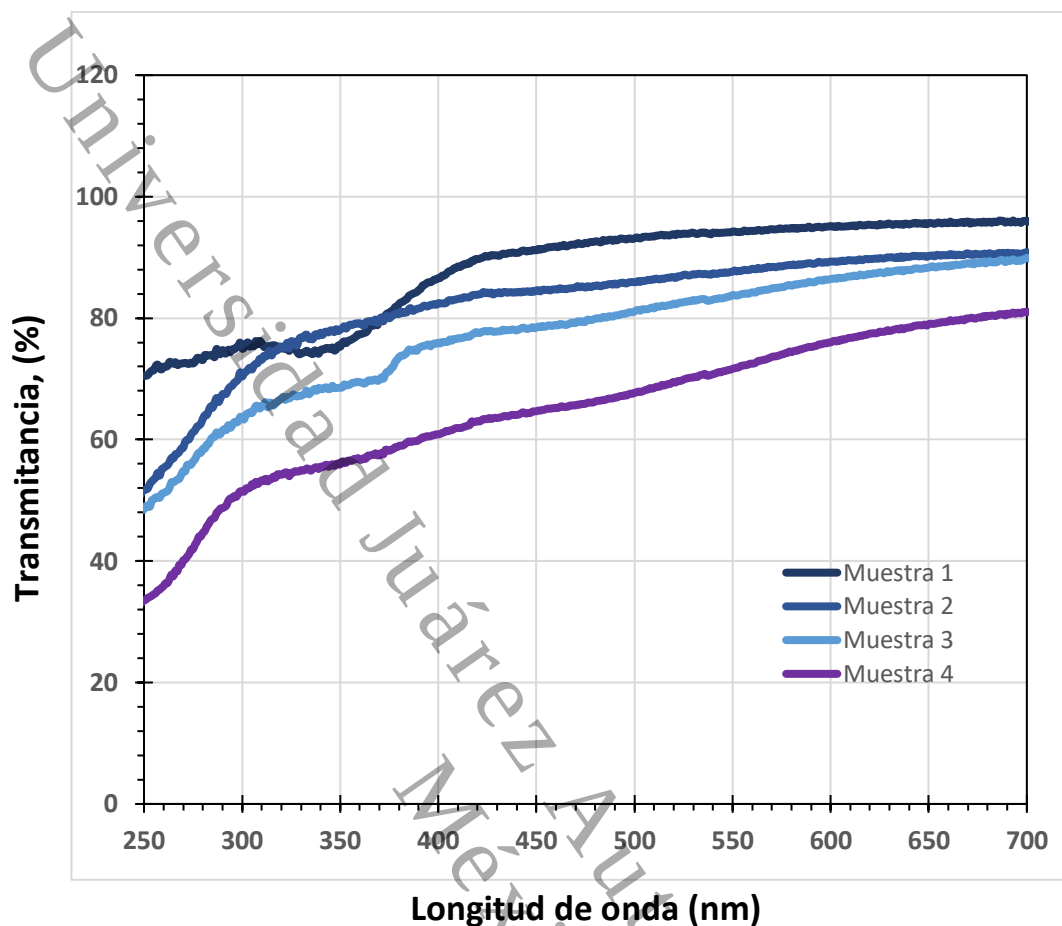


Figura 4.6. Espectro de transmitancia UV-VIS de las muestras de SiO_2 .

En la figura 4.6, se indica todos los materiales presentan un valor de transmitancia mayor a 60% en un rango de 400 a 700 nm. Adicionalmente, para la muestra 1 un borde de absorción entre 350 a los 450 nm. De igual forma, la muestra 2 entre los 250 y 350 nm, y las muestras 3 y 4 entre los 250 y 320 nm respectivamente. Esto indica el rango en el que se encuentra la banda prohibida.

4.3.1 Cálculo de la banda prohibida

Utilizando los datos de longitud de onda y transmitancia, se empleó el método Tauc para determinar los coeficientes de absorción mediante la siguiente relación (Ec. 1).

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{1}{T}\right)}{d}$$

Ecuación 1

Donde T corresponde a la transmitancia y d al espesor de película (Pantoja Enriquez et al, 2012).

La banda prohibida se determinó graficando α^2 contra $h\nu$, para ello se tomó el valor de $h\nu$ contenido en la intersección entre la porción de línea recta del gráfico y el eje de las abscisas (Fig. 4.7).

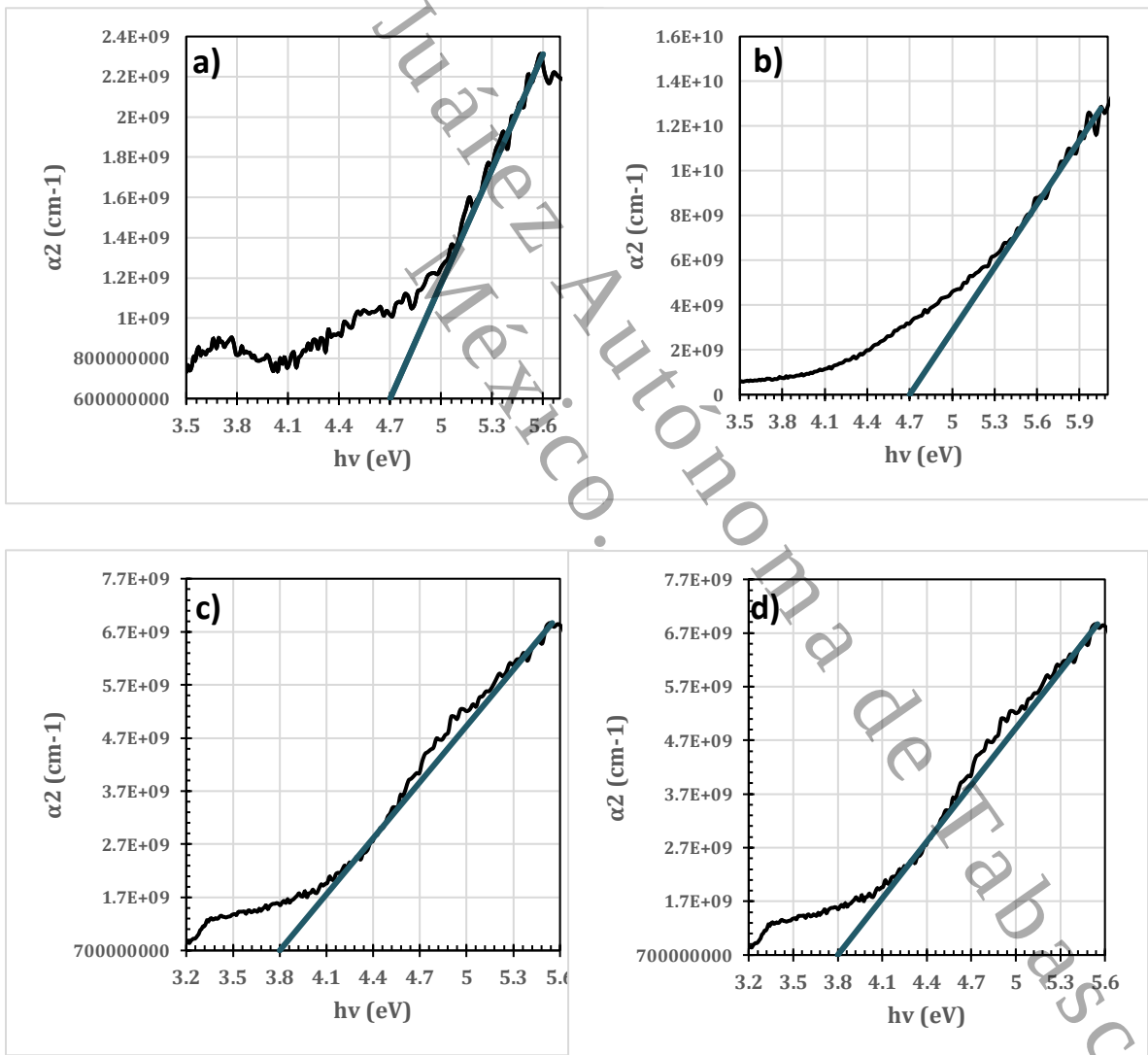


Figura 4.7. Cálculo de la banda prohibida del SiO2. (a) Muestra 1, (b) Muestra 2, (c) Muestra 3, (d) Muestra 4.

Se calculó una banda prohibida de 4.7, 4.7, 3.8 y 3.6 eV para las muestras 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Los valores determinados son congruentes con lo reportado por Khedkar *et al.*, (2019), en el que se utilizó una técnica semejante en la síntesis del material.

4.4 Propiedades térmicas

Se obtuvo la curva de termogravimetría graficando los valores de porcentaje de masa con respecto a la temperatura (Fig. 4.8).

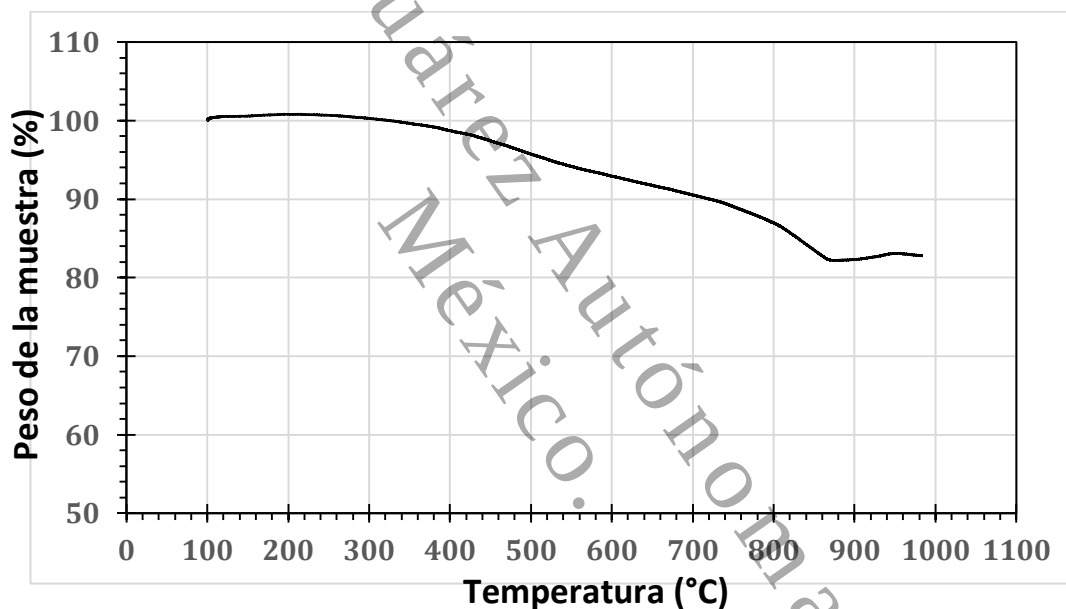


Figura 4.8. Curva termogravimétrica de la muestra de SiO_2 .

Se observa una degradación gradual del 100 al 80% desde los 200 hasta los 800 °C. Entre 800 °C y 1000 °C, la masa se estabiliza alrededor del 80%.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Se sintetizó el material utilizando la técnica de intercambio de solvente mediante química húmeda a las condiciones de presión ambiente.

La variación en las cantidades de amberlita añadida a las soluciones precursoras para obtener un pH, propició la gelificación, determinando la cantidad adecuada para la obtención de soles con $\text{pH} \sim 5$. Se observó que el pH disminuía al añadir una mayor cantidad de amberlita a la solución. Estas variaciones se efectuaron de manera experimental midiendo el pH conforme se añadía más resina.

En la síntesis se obtienen mejores resultados si la solución se somete a una temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 20 min durante la etapa de gelificación, ya que para el caso de las muestras 1, 3 y 4, se obtuvieron geles después de dicho tratamiento térmico. Las condiciones de temperatura influyen en el proceso de gelificación, a temperatura ambiente se alcanza en un tiempo mayor a 72 hrs.

Con respecto a la caracterización del material, los espectros de rayos X dictaminan que el material no presenta estructura cristalina, debido principalmente a temperatura que se utiliza durante la síntesis.

En cuanto a sus propiedades ópticas, los valores alcanzados de la banda prohibida están en el orden de 3.7 a 4.7 eV, confirmando las características de un material semiconductor. Las muestras 3 y 4 presentan una banda prohibida menor, esto se atribuye principalmente a que durante su síntesis se empleó mayor cantidad de solvente.

Por parte de las propiedades térmicas, el hecho de que la curva se mantenga entre 100 y 80% de 200 a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, indica que la muestra está perdiendo masa de manera gradual debido a la descomposición térmica de sus componentes, sin embargo, una parte significativa de la muestra es resistente a temperaturas elevadas hasta los $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

RECOMENDACIONES

Se recomienda variar tanto el tiempo, como las cantidades de agua y etanol a su consideración en la etapa de hidrólisis, con la finalidad de lograr una estructura cristalina en el producto final. Con este mismo objetivo, se recomienda aumentar la temperatura a la que se trabaja durante el proceso de gelificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, P., Dias, D. A., & Pontinha, A. D. R. (2022). Silica aerogel-rubber composite: A sustainable alternative for buildings' thermal insulation. *Molecules*, 27(20), 7127. <https://doi.org/10.3390/molecules27207127>
- Bakhshpour, M., Idil, N., Perçin, I., & Denizli, A. (2019). Biomedical applications of polymeric cryogels. *Applied Sciences*, 9(3), 553. <https://doi.org/10.3390/app9030553>
- Bautista Ruiz, J. H., Ortiz Otálora, C. A., Parada Albarracín, B. C., & Vera López, E. (2008). El proceso sol-gel.
- Delvasto Arjona, S., Bolaños Barrera, G. E., Pardo, J. D., Rodríguez Cabrera, E., Gómez Rivera, M. A., Torres León, J. A. & Bernal Medaglia, L. M. (2019). Aerogeles de nanosílice para recubrimientos superaislantes ecosostenibles.
- Dorcheh, A. S., & Abbasi, M. H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. *Journal of materials processing technology*, 199(1-3), 10-26. [10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060)
- Du, D., Jiang, Y., Feng, J., Li, L., & Feng, J. (2020). Facile synthesis of silica aerogel composites via ambient-pressure drying without surface modification or solvent exchange. *Vacuum*, 173, 109117. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109117>
- Gurav, J. L., Jung, I. K., Park, H. H., Kang, E. S., & Nadargi, D. Y. (2010). Silica aerogel: synthesis and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2010, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2010/409310>
- Gutierrez Cano, V.; Menelaou, M.; Kastyl, J.; Cihlář, J.; Tkachenko, S.; González, J.A.; Kalmár, J.; Fabian, I.; Lázár, I.; Čelko, L. Rare-Earth Zirconate Ln₂Zr₂O₇ (Ln: La, Nd, Gd, and Dy) Powders, Xerogels, and Aerogels: Preparation, Structure, and Properties. *Inorg. Chem.* 2019, 58, 14467–14477. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b01965>

- Khedkar, M. V., Somvanshi, S. B., Humbe, A. V., & Jadhav, K. (2019). Surface modified sodium silicate based superhydrophobic silica aerogels prepared via ambient pressure drying process. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 511, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.004>
- Lamy-Mendes, A., Pontinha, A. D. R., Alves, P., Santos, P., & Durães, L. (2021). Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 286, 122815. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122815>
- Lee, J., & Park, S. (2020). Recent advances in preparations and applications of carbon aerogels: A review. *Carbon*, 163, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.073>
- Mariana, M., HPS, A. K., Yahya, E. B., Olaiya, N. G., Alfatah, T., Suriani, A. B., & Mohamed, A. (2022). Recent trends and future prospects of nanostructured aerogels in water treatment applications. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102481. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102481>
- Mavelil-Sam, R., Pothan, L. A., & Thomas, S. (2018). Chapter 1. Polysaccharide and Protein Based Aerogels: An Introductory Outlook. *En RSC green chemistry series* (pp. 1-8). <https://doi.org/10.1039/9781782629979-00001>
- Mazrouei-Sebdani, Z., Begum, H., Schoenwald, S., Horoshenkov, K. V., & Malfait, W. J. (2021). A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications. *Journal Of Non-crystalline Solids*, 562, 120770. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120770>
- Pantoja Enríquez, Joel & Ibáñez, Guillermo & Moreira, J. & Hernández, L & Reyes-Nava, Juan & Pérez-Hernández, Germán & Sebastian, Joseph. (2012). Influence of CdCl₂ Annealing Treatment on the Physical Properties of Chemical Bath Deposited CdS Thin Films. *International Journal of Science and Advanced Technology*. 2. 2221-8386.

- Pramanik, R.; Ganivada, B.; Ram, F.; Shanmuganathan, K.; Arockiarajan, A. Influence of nanocellulose on mechanics and morphology of polyvinyl alcohol xerogels. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2019, 90, 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.10.024>
- Rai, N., & Chauhan, I. (2023). Multifunctional Aerogels: A comprehensive review on types, synthesis and applications of aerogels. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 105(2), 324-336. <https://doi.org/10.1007/s10971-022-06026-1>
- Rashid, A. B., Shishir, S. I., Mahfuz, M. A., Hossain, M. T., & Hoque, M. E. (2023). Silica aerogel: Synthesis, characterization, applications, and recent advancements. *Particle & Particle Systems Characterization*, 40(6), 2200186. <https://doi.org/10.1002/ppsc.202200186>
- Reyhani, R., Zadhoush, A., Tabrizi, N. S., Nazockdast, H., & Naeimirad, M. (2021). The influence of CNT-doped carbon aerogels on microstructural, rheological and mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Composites Science And Technology*, 215, 109031. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109031>
- Shi, F., Wang, L., & Liu, J. (2006). Synthesis and characterization of silica aerogels by a novel fast ambient pressure drying process. *Materials Letters*, 60(29-30), 3718-3722. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.03.095>
- Tawiah, B., Ofori, E. A., & Bin, F. (2023). Scientometric Review of Sustainable Fire-Resistant Polysaccharide-Based Composite Aerogels. *Sustainability*, 15(16), 12185. <https://doi.org/10.3390/su151612185>
- Villegas, M. Á. (1990). Aerogeles. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 29(5), 315-329.
- Zhang, Y., Wang, J., & Zhang, X. (2018). Surfactant-free synthesis of silica aerogel microspheres with hierarchically porous structure. *Journal of colloid and interface science*, 515, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.010>
- Zhao, C., Li, Y., Ye, W., Shen, X., Yuan, X., Ma, C., & Cao, Y. (2021). Performance regulation of silica aerogel powder synthesized by a two-step

Sol-gel process with a fast ambient pressure drying route. Journal of Non-Crystalline Solids, 567, 120923.
<https://doi.org/10.1016/j.inoncrysol.2021.120923>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ANEXOS

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de la tesis	Síntesis de aerogel de sílice (SiO ₂) mediante los procesos sol-gel y secado a presión ambiente (APD)
Autor (a) de la tesis	Luis Romario Vargas Martínez
ORCID	https://orcid.org/0009-0007-5557-1061
Resumen de la tesis	En el presente trabajo se desarrolla la síntesis de aerogeles de sílice, mediante proceso sol-gel, secado a presión atmosférica y temperatura ambiente. La metodología incluye la preparación de una solución con silicato de sodio, agua y amberlita, seguido de la obtención del gel, hidrólisis para fortalecerlo, sustitución del solvente y secado a presión ambiente. Se realizaron pruebas para caracterizar las propiedades del SiO₂ sintetizado, utilizando las técnicas de rayos X, espectroscopia UV-Vis y Análisis Termogravimétrico. El material obtenido no presenta estructura cristalina, indicando características amorfas. Las propiedades ópticas muestran que la banda prohibida del material varía de 3.7 a 4.7 eV, típicas de un semiconductor. Térmicamente, la muestra pierde masa gradualmente entre 200 y 800 °C, pero se mantiene estable hasta los 800 °C.
Palabras clave de la tesis	Aerogeles de sílice, sol-gel, SiO ₂ , banda prohibida, semiconductor.
Referencias citadas	

Síntesis de aerogel de sílice (SiO_2) mediante los procesos sol-gel y secado a presión ambiente (APD)

Por LUIS ROMARIO VARGAS MARTÍNEZ

CANTIDAD DE PALABRAS 7223

HORA DE ENTREGA

14-OCT-2024 11:46 P.M.

NÚMERO DE
IDENTIFICACIÓN DEL
TRABAJO

112334455

Síntesis de aerogel de sílice (SiO₂) mediante los procesos sol-gel y secado a presión ambiente (APD)

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	bibliotecadigital.univalle.edu.co Internet	113 palabras — 2%
2	www.clubensayos.com Internet	56 palabras — 1%
3	repositorio.chapingo.edu.mx Internet	40 palabras — 1%
4	www.nal.ics.es.osaka-u.ac.jp Internet	22 palabras — < 1%
5	digitalassets.lib.berkeley.edu Internet	21 palabras — < 1%
6	vdocuments.es Internet	20 palabras — < 1%
7	ELISA ADELL SALES. "Material particulado y bioaerosoles en el aire de granjas de aves y conejos: cuantificación, caracterización y medidas de reducción", Universitat Politècnica de Valencia, 2014 Crossref Posted Content	16 palabras — < 1%
8	dergipark.org.tr Internet	15 palabras — < 1%



COORDINACIÓN
DE ESTUDIOS
TERMINALES