



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

“SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE AEROGELAS BASADOS EN TANINOS EXTRAÍDOS DE CORTEZA DE EUCALIPTO” TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

QUÍMICO FARMACOBIOLOGO

PRESENTA

Valeria Prado Vargas

DIRECTORA

DRA. DOLORES JUDITH CABALLERO JIMÉNEZ

CODIRECTORA

DRA. MARIA ANA PÉREZ CRUZ



Facultad de Ciencias Químicas BUAP

Puebla, Puebla

Febrero, 2026.

1. AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fortaleza para superar cada reto y acompañarme con fe y esperanza en este camino lleno de aprendizajes.

A mis padres, **Gloria Vargas y Olegario Víctor Prado**, por ser el mayor ejemplo de amor, esfuerzo y apoyo incondicional. A mi padre, por motivarme siempre a luchar por mis metas, enseñarme a creer en mí y guiarme con sus consejos y su paciencia; y a mi madre, por ser el corazón que mantiene unida a nuestra familia, por su entrega, sus consejos, su paciencia y por acompañarme en cada paso. Todo lo que soy y he logrado se los debo a ustedes.

A mis hermanos, **Bernardo, Rodrigo y Hermenegildo**, por ser una parte esencial de mi vida, por su cariño, comprensión y apoyo constante. Gracias por acompañarme en cada etapa, por las risas, los consejos y por recordarme siempre que nunca estoy sola.

A la **Dra. Dolores Judith Caballero Jiménez**, mi asesora de tesis, por su guía, paciencia y confianza a lo largo de este proyecto. Gracias por creer en mí, por su apoyo constante durante los experimentos y por motivarme a continuar incluso en los momentos más difíciles. Más allá de su papel como asesora, agradezco profundamente que también se haya convertido en una amiga y una inspiración.

A la **Dra. María Ana Pérez Cruz**, mi codirectora, por su dedicación, compromiso y por compartir sus conocimientos con tanta claridad. Gracias por acompañarme en los experimentos, por sus valiosas explicaciones y por su constante disposición para orientarme.

Al **Dr. Esteban**, por su apoyo durante la realización de los experimentos, su paciencia al explicarme y su amabilidad al resolver cada una de mis dudas.

Al **Dr. Eric Aguilar García**, por su ayuda y orientación en todos los experimentos, por su paciencia al enseñarme, por acompañarme en cada proceso y por su constante apoyo. Agradezco también su amistad y la confianza que me brindó a lo largo de este trabajo.

A **Néstor**, compañero de servicio y de tesis, por su ayuda, disposición, explicaciones y colaboración constante en cada etapa de este proyecto.

Y a **Ángelo Lemini**, por estar conmigo incluso en los momentos más difíciles, por apoyarme, cuidarme y darme siempre los ánimos necesarios para continuar y culminar con esta hermosa etapa profesional.

A todos los que, de una u otra forma, formaron parte de este proceso y contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad gracias infinitas.

2. CONTENIDO

1. Agradecimientos.....	2
2. Contenido	4
3. Abreviaturas	6
4. Nomenclatura y Símbolos	6
5. Introducción	8
5.1. Hipótesis	10
5.2. Justificación	10
5.3. Objetivos.....	12
5.3.1. Objetivo General.....	12
5.3.2. Objetivos Particulares.....	13
6. Marco teórico y conceptual.....	13
6.1. Taninos	13
6.1.1. Taninos hidrolizables.....	15
6.1.2. Taninos condensados o Proantocianidinas	15
6.1.3. Aplicaciones	16
6.2. Aerogel	17
6.2.1. Orígenes del Aerogel.....	17
6.2.2. Tipos	19
6.3. Adsorción	20
6.3.1. Características Principales.....	20
6.3.2. Cinética de adsorción.....	21
7. Metodología	24
7.1. Preparación de la corteza.....	24
7.2. Extracción de taninos por método Soxhlet.....	25
7.3. Síntesis de Gel	27
7.3.1. Procedimiento.....	27
7.4. Síntesis del Aerogel.....	29
7.5. Caracterización	33
7.5.1. Espectroscopía de Infrarrojo (IR).....	33
7.5.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	36
7.5.3. Cinéticas de adsorción.....	39
7.5.4. Ajuste de cinéticas de adsorción a modelos	45

8. Conclusiones	54
9. Bibliografía.....	55

3. ABREVIATURAS

Sigla	Significado
IR / FT-IR	Espectroscopía infrarroja (transformada de Fourier)
SEM / UHR-FESEM	Microscopía electrónica de barrido (emisión de campo, alta resolución)
CO ₂ / CH ₄ / N ₂	Dióxido de carbono / Metano / Nitrógeno
HF	Ácido fluorhídrico
NaOH	Hidróxido de sodio
KBr	Bromuro de potasio (pastillas para FT-IR)
PSO	Modelo cinético de pseudo-segundo orden
PFO	Modelo cinético de pseudo-primer orden
WM	Modelo de difusión intraparticular (Weber–Morris)
R ² / Adj. R ²	Coefficiente de correlación / ajustado
MST	Muestra sin tratar

4. NOMENCLATURA Y SÍMBOLOS

Símbolo	Definición	Unidad
T	Tiempo	<i>Segundos (s) o minuto (min)</i>
$\sqrt{t}$	Raíz del tiempo	

T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$ (grados Celsius) o K (kelvin)
P	Presión	Torr (o Pa, consistente por tabla)
V	Volumen	L (litros)
m	Masa de adsorbente	Gramos (g)
q_t	Cantidad adsorbida al tiempo t	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$
q_e	Cantidad adsorbida en equilibrio	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$
$q_{e,exp}$	q_e experimental (plateau de la curva cruda)	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$
$q_{e,mod}$	q_e estimado por el modelo	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$
k_1	Constante cinética (PFO)	s^{-1} (o min^{-1})
k_2	Constante cinética (PSO)	$\text{g} \cdot \text{mmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
k_{id}	Constante de difusión intraparticular (WM)	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-\frac{1}{2}}$
C	Intercepto en WM (capa límite)	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$
α <i>alpha</i>	Parámetro de Elovich (tasa inicial)	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
β <i>beta</i>	Parámetro de Elovich (relacionado con heterogeneidad)	$\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$
M	Pendiente del ajuste lineal	—
B	Intercepto del ajuste lineal	—

5. INTRODUCCIÓN

Los aerogeles son materiales sólidos que se caracterizan por su ligereza y alta porosidad. Fueron obtenidos por primera vez en la década de 1930 por el científico estadounidense Samuel Stephens Kistler, mediante el uso de silicato de sodio. Desde entonces, su evolución ha permitido su implementación en diversos sectores, gracias a propiedades únicas como su densidad extremadamente baja (hasta 0.001 g/cm^3) y una estructura compuesta en un 99.8% por aire (Kistler, 1932). Esto les confiere una superficie específica muy alta y una baja conductividad térmica, lo que los convierte en excelentes aislantes térmicos, además de que poseen una gran capacidad de adsorción. (Hüsing & Schubert, 1998)

Debido a estas propiedades, los aerogeles han sido usado en diversas aplicaciones como las que se muestran a continuación:

- Aislamiento térmico eficiente: Debido a su baja conductividad térmica, los aerogeles son excelentes para el aislamiento térmico y acústico en edificios y en la industria, lo que puede contribuir significativamente al ahorro energético. (Benedito Borrás, 2013)
- Desionización capacitiva efectiva: Los aerogeles de carbono dopados con nitrógeno han mostrado gran potencial para la electroadsorción de iones, lo que es útil en procesos de purificación de agua. (Rasines, 2015)
- Envasado de alimentos: Se están desarrollando biocompuestos híbridos que incorporan aerogeles de sílice en matrices de biopolímeros como el PLA para mejorar las propiedades de estabilidad térmica en envases alimentarios. (Aragón-Gutiérrez et al., 2018)
- Implantes: Los aerogeles tienen aplicaciones prometedoras en el campo biomédico, incluyendo su uso como implantes óseos bioactivos. La incorporación de calcio en aerogeles híbridos inorgánico-orgánicos les confiere propiedades bioactivas, cumpliendo requisitos para su uso como implantes. (Toledo-Fernández et al., 2007)

- Catalizadores: Los aerogeles de carbono, especialmente cuando están dopados con metales, son excelentes catalizadores y electrocatalizadores para reacciones orgánicas específicas debido a su alta área superficial, porosidad accesible, estabilidad química, estabilidad térmica, y baja conductividad eléctrica. (Sanchez, 2012)
- Adsorción de gases contaminantes: La estructura altamente porosa y gran área superficial los hace ideales para la captura y almacenamiento de gases.. (Toledo-Fernández et al., 2007)

Particularmente, los aerogeles a base de taninos son un material que combina la ligereza y la resistencia de los aerogeles con las propiedades de los taninos, los cuales son compuestos orgánicos polifenólicos encontrados en plantas, semillas, frutos, hojas y madera, entre otros (Figura 1). Se ha reportado que la incorporación de taninos en la estructura de los aerogeles no solo mejora la sostenibilidad del material, sino que también aporta propiedades como la capacidad de adsorción y la mejora de su reactividad química (Celzard et al., 2012).

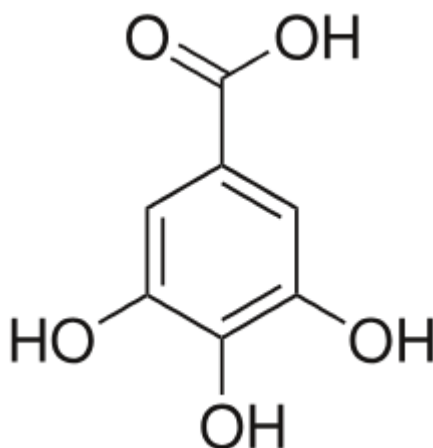


Figura 1. Estructura de los taninos (Isaza M, 2007)

Debido a esto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar y caracterizar aerogeles a base de taninos obtenidos de fuentes cortezas de Eucalipto, para evaluar

sus propiedades físicas y químicas y su potencial aplicación para la adsorción, separación y almacenamiento de gases contaminantes tales como CO₂ y CH₄.

5.1.HIPÓTESIS

La síntesis de aerogeles derivados de taninos extraídos de corteza de Eucalipto producirá materiales ultraligeros y altamente porosos, caracterizados por una elevada capacidad de adsorción y eficiencia en el almacenamiento y separación selectiva de CO₂ y CH₄.

5.2.JUSTIFICACIÓN

La Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define al cambio climático como “el atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”.

En 1896, el matemático sueco Svante Arrhenius fue el primero en calcular y cuantificar la influencia del efecto invernadero, obteniendo que una reducción de los niveles de CO₂ atmosféricos a la mitad de los existentes, supondría un descenso de temperatura del planeta de entre 4 y 5 °C, lo que podría conducir a un enfriamiento masivo como el que se produjo durante las glaciaciones. En los 90's, por las mejoras de la fidelidad de los modelos informáticos y del trabajo experimental se afirmó que las emisiones humanas tanto de CO₂ como de CH₄, ocasionarían serios problemas de calentamiento global. Desde entonces, la preocupación de la comunidad científica ha sido tan fuerte, que se han formado grupos específicos para el estudio de las causas y efectos del calentamiento global, tal como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que tiene su sede en Ginebra y cuenta con la participación de 195 países miembros. (Martínez-Alier et al., 2018; Ross & Baldwin, 2018)

Se estima que, de no enfrentarse el cambio climático, alrededor del 50% de los ecosistemas forestales en México se verán alterados. En las zonas bajas del Golfo de México se observará un aumento del nivel medio del mar; la agricultura sufrirá una reducción severa; y las

industrias, así como las actividades productivas dependientes del clima, experimentarán transformaciones significativas. (Estrada et al., 2022) Los efectos sobre la población se reflejarán en la calidad de la salud, el incremento de los flujos migratorios, la disminución en el acceso a los servicios de agua y una mayor concentración poblacional en los centros urbanos. (Burnett et al., 2018) Todo esto, para el año 2030, representará un impacto económico equivalente al 1.1% del Producto Interno Bruto.

Por lo anterior, la creciente preocupación por el control de las emisiones de gases de efecto invernadero ha impulsado la búsqueda de materiales eficaces para su almacenamiento, separación y transporte (Sánchez-Yáñez, 2014; Palma et al., 2024). En este contexto, han surgido materiales innovadores de origen natural, como los aerogeles elaborados a partir de taninos, que son compuestos polifenólicos presentes en diversas plantas y frutas que constituyen una fuente renovable y sostenible. El empleo de taninos en la síntesis de aerogeles no solo representa una alternativa ecológica frente a los aerogeles convencionales, basados en sílice o polímeros sintéticos, sino que también aporta valor agregado a las cortezas desprendidas de los árboles comúnmente consideradas residuos forestales, promoviendo así una economía circular y favoreciendo los siguientes aspectos:

- **Sostenibilidad y medio ambiente:** El uso de taninos como materia prima para la síntesis de aerogeles promueve el uso de recursos naturales renovables, reduciendo la dependencia de materiales sintéticos y no biodegradables. Esto contribuye a la mitigación del impacto ambiental y al desarrollo de tecnologías más verdes.
- **Innovación y desarrollo científico:** La investigación en aerogeles de taninos es aún incipiente. Este estudio busca contribuir al avance del conocimiento en este campo, desarrollando nuevas metodologías de síntesis y caracterización de materiales, y evaluando sus propiedades y aplicaciones potenciales.
- **Valor económico:** El aprovechamiento de taninos de fuentes naturales puede generar nuevas oportunidades económicas, especialmente en regiones con abundancia de recursos vegetales. Esto puede fomentar la creación de industrias locales y la generación

de empleo, promoviendo el desarrollo socioeconómico.

- **Propiedades y aplicaciones:** Los aerogeles de taninos poseen propiedades únicas que pueden ser aprovechadas en diversas aplicaciones, tales como aislamiento térmico y acústico, adsorción de contaminantes, y como soportes para catalizadores. La caracterización de estas propiedades permitirá identificar las áreas de mayor potencial.
- **Adsorción de gases:** Una de las aplicaciones más prometedoras de los aerogeles de taninos es su uso como adsorbentes de gases. Su alta porosidad y superficie específica los hacen ideales para capturar, separar y retener gases contaminantes como CO₂, CH₄ y otros gases de efecto invernadero. Esta capacidad de adsorción no solo tiene implicaciones positivas para la mitigación del cambio climático, sino que también abre nuevas posibilidades en el campo de la purificación de aire y el tratamiento de emisiones industriales.

La presente investigación no solo aborda una necesidad científica y tecnológica, sino que también responde a desafíos ambientales y económicos actuales. El desarrollo de aerogeles con base en taninos obtenidos de fuentes naturales representa un paso hacia la integración de materiales sostenibles en la industria y la promoción de prácticas más responsables y ecológicas.

5.3.OBJETIVOS

5.3.1. Objetivo General

Sintetizar materiales de tipo aerogeles basados taninos provenientes de corteza de Eucalipto para su aplicación como material adsorbente de CO₂ y CH₄.

5.3.2. Objetivos Particulares

- Obtener las condiciones óptimas para extraer taninos de fuentes naturales, específicamente de las cortezas de Eucalipto, con el mejor rendimiento y usando métodos con el menor impacto posible al medio ambiente.
- Obtener las condiciones óptimas para sintetizar geles usando los extractos de taninos y agentes gelificantes en diversas relaciones de masa.
- Obtener aerogeles usando los geles obtenidos anteriormente.
- Caracterizar los geles y aerogeles obtenidos mediante infrarrojo (IR), microscopía de barrido electrónico (SEM).
- Verificar las propiedades adsorbentes de los aerogeles obtenidos frente a los gases CO₂ y CH₄ a diversas temperaturas.

6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

6.1. TANINOS

Los taninos tienen la propiedad de formar complejos con proteínas. Son compuestos que se oxidan al contacto con el aire, inodoros y de sabor agrio, solubles en agua, alcohol y acetona, reaccionan con el cloruro férrico y otras sales. Son compuestos combustibles con un punto de inflamación de 199 °C, poseen una temperatura de autoignición de 528.5°C y resultan poco tóxicos por ingestión o inhalación. (Santos Ucha, 2013a)

Estos compuestos se encuentran ampliamente distribuidos en el reino vegetal y se presentan en especies de familias vegetales de todo el mundo. Se han identificado aproximadamente 500 especies de plantas que contienen varias cantidades de taninos entre las principales familias botánicas. Entre las más destacadas se pueden citar a las Leguminosae, Rosaceae, Polygonaceae, Fgaceae, Rhyzophoraceae, Myrtaceae y Melastomataceae. Existen además otros géneros, como las acacias (*Acacia* spp.), las encinas (*Quercus* spp.) y algunos pinos (*Pinus* spp.). (Santos Ucha, 2013a) La composición química de la corteza de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) se presenta en la Tabla 1 (Santos Ucha, 2013).

Tabla 1. Composición química de la corteza de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Santos Ucha, 2013)

	Corteza de Eucalipto (% sobre base seca)
Cenizas	4.74
Extractos	
Agua Fría	2.59
Agua caliente	5.31
1% NaOH	26.58
Material libre de extractos	80.80
Lignina insoluble en ácido	16.73
Lignina soluble en ácido	2.48
Celulosa	41.63
Azúcares totales	62.47
Monosacáridos	60.98
Glucosa	42.91
Galactosa	2.21
Xilosa	12.72
Arabinosa	2.26
Manosa	0.88

Actualmente la definición más aceptada por la comunidad científica es la de Bate-Smith y Swain (1962): “Compuestos fenólicos solubles en agua, con peso moleculares entre 500 y 3.000 umas, que además de dar las reacciones usuales del fenol, tienen propiedades especiales tales como la capacidad de precipitar alcaloides, gelatinas y otras proteínas”.

Específicamente en la corteza de Eucalipto se ha detectado que es posible extraer taninos en concentraciones de entre 3 y 5% cuando se utilizaba agua, mientras que se obtiene alrededor del 26% cuando la extracción se realiza con NaOH al 1%. Los taninos se clasifican en dos clases principales: taninos condensados o poliflavonoides taninos hidrolizables.

6.1.1. Taninos hidrolizables

Son ésteres de ácidos fenólicos con una molécula de glucosa o un polialcohol. Hoy en día se han descubierto más de 750 estructuras de nuevos taninos hidrolizables. Se clasifican en galotaninos y elagitaninos.

- Galotaninos: son ésteres del ácido gálico y del ácido digálico unidos entre sí por funciones ésteres entre el grupo $-\text{COOH}$ de uno de ellos y el $-\text{OH}$ del otro y a su vez unidos a monosacáridos como la glucosa. La estructura típica de esta familia es la de la pentagaloil glucosa (β 1,2,3,4,6-pentagaloil-O-D-glucosa o PGG), la cual tiene cinco enlaces éster idénticos que envuelven a los grupos hidroxilo alifáticos del anillo del azúcar. La forma enantiomérica α no se encuentra habitualmente en la naturaleza. (Santos Ucha, 2013a)
- Elagitaninos: están conformados por los grupos galoilo que esterifican hidroxilos adyacentes del poliol y que se unen, a su vez, oxidativamente entre sí mediante enlaces C-C para formar ésteres de ácido hexahidroxidifénico (A) que por hidrólisis forma ácido hexahidroxidifénico (B), el cual espontáneamente, se convierte en la forma lactona o ácido elágico. (Santos Ucha, 2013b)

6.1.2. Taninos condensados o Proantocianidinas

Existen como oligómeros solubles con 2 a 6 núcleos fenólicos flavan-3-ol (catequina, epicatequina, epigallocatequina o epigallocatequina 3-O-galato), o como polímeros insolubles

6.1.3. Aplicaciones

Los taninos tienen una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias y campos de estudio. A continuación, se detallan algunas de sus principales aplicaciones:

Aplicaciones en la industria de la curtición

- Los taninos han sido utilizados históricamente en el curtido de cueros para endurecerlos y mejorar su calidad. La extracción de taninos de la corteza de árboles como el pino es un proceso común en la industria de la curtición. (López-Suevos Fragueta, 2003)

Aplicaciones Biológicas e Industriales

- La corteza de árboles como el *Pinus patula* es una fuente rica en taninos, y la extracción de estos compuestos tiene interesantes aplicaciones biológicas e industriales. La determinación de las mejores condiciones de extracción y el desarrollo de métodos cromatográficos para la determinación de catequina son ejemplos de estas aplicaciones. (López-Suevos Fragueta, 2003)
- La fermentación de taninos con organismos como hongos y bacterias puede producir productos metabólicos de gran importancia industrial. Este proceso se utiliza para la remoción de taninos del plátano verde de rechazo.

Aplicaciones en la industria de la madera

- Los taninos pueden ser utilizados para la formulación de adhesivos industriales. La extracción de taninos de la corteza del pino es una alternativa para aprovechar mejor el residuo industrial de la industria maderera.
- La madera de Eucalipto, que presenta excelentes propiedades mecánicas, está siendo utilizada en la fabricación de tableros de madera. La extracción de taninos de la corteza del pino puede ser una opción para mejorar la calidad de estos tableros.

Aplicaciones en la industria alimentaria

- Se usan en la elaboración de productos como el vino y el café.
- En cerveza que no ha sido recientemente preparada, las proteínas se combinan con los polifenoles para formar complejos que son responsables de la presencia de turbidez, al agregar los taninos, el nivel de proteínas disminuye a un valor apropiado y se aumenta

así el tiempo de almacenamiento. (Herrera-Fuentes et al., 2017)

- Se pueden eliminar impurezas proteínicas por precipitación con taninos, así como en la preservación y maduración de alimentos, aprovechando sus propiedades antisépticas y antioxidantes, y también en la clarificación del vino blanco. (Herrera-Fuentes et al., 2017)

Aplicaciones en la industria de la salud

- Se aprovecha el efecto cariostático (inhibidor de caries) de los taninos, el efecto inhibidor para el crecimiento de diversos virus y la actividad hemostática y antiinflamatoria en formulaciones basadas en taninos. (Herrera-Fuentes et al., 2017)

6.2. AEROGEL

6.2.1. Orígenes del Aerogel

El término aerogel fue empleado por primera vez por Samuel Stephens Kistler en 1931, quién desarrolló este material en un intento de reemplazar el líquido de un gel con gas, sin que la estructura del gel colapsara mediante un proceso de secado supercrítico. La metodología de Kistler fue pionera, sentando las bases para el desarrollo de un material con propiedades únicas, tales como baja densidad y alta porosidad. (Kistler, 1931)

Décadas de 1960 y 1970

Durante este periodo, la investigación sobre aerogeles se expandió considerablemente debido a sus propiedades de aislamiento térmico y alta superficie específica. Los científicos comenzaron a explorar aplicaciones industriales y científicas, utilizando aerogeles como medios para sintetizar catalizadores y materiales de aislamiento en diversas industrias como la aeroespacial. (Adam, 2007). En 1968, Nicolaon y Teichner sintetizaron aerogeles a partir de alcóxidos de silicio y tetrametilortosilicato (TMOS), lo que permitió reducir el tiempo de síntesis. (Hüsing & Schubert, 1998)

Avances Tecnológicos en la Producción (1980-1990)

En las décadas de 1980 y 1990 se desarrollaron métodos de producción más eficientes y menos costosos, permitiendo la expansión de su uso en diversas aplicaciones como en proyectos de la NASA, particularmente en misiones que requerían un aislamiento térmico extremo. La NASA utilizó aerogeles en trajes espaciales y en el aislamiento de vehículos espaciales, aprovechando sus propiedades únicas para proteger a los astronautas y equipos en condiciones extremas. («Aerogels Insulate Missions and Consumer Products», 2008)

Aerogel en el Siglo XXI: Innovaciones y Nuevas Aplicaciones

Hoy en día, los aerogeles se utilizan en una amplia gama de aplicaciones. En el sector de la construcción, los aerogeles se utilizan como materiales de aislamiento térmico en edificios, proporcionando una alternativa más eficiente y ligera a los aislantes tradicionales. En la industria energética, se utilizan en sistemas de almacenamiento de energía debido a su alta capacidad de adsorción y estabilidad térmica, por lo que han demostrado ser eficaces en la recuperación de derrames de petróleo. Esta propiedad los convierte en una herramienta valiosa para la mitigación de desastres ambientales. En la industria de los materiales, se usan para la construcción de vehículos ligeros y resistentes, contribuyendo a la reducción de peso y mejora del rendimiento energético de automóviles y aviones.

Futuro del Aerogel

La investigación y el desarrollo de aerogeles continúan avanzando, con nuevas formulaciones y métodos de producción en constante evolución. Los científicos están explorando la incorporación de diferentes materiales en la estructura de los aerogeles para mejorar sus propiedades y ampliar sus aplicaciones. Como ejemplo, los aerogeles de carbono están siendo investigados para su uso en supercondensadores y baterías de alta eficiencia, mientras que los aerogeles híbridos combinan materiales orgánicos e inorgánicos para aplicaciones especializadas en biomedicina y electrónica.

6.2.2. PROPIEDADES

Algunas de las propiedades más características de los aerogeles se describen a continuación:

Baja densidad

- Los aerogeles tienen una densidad extremadamente baja, típicamente entre 0.003 y 0.5 g/cm³, lo que los hace algunos de los materiales sólidos más ligeros conocidos. (Hüsing & Schubert, 1998)

Alta porosidad

- Poseen una porosidad muy alta, generalmente entre 80-99.8%, lo que les confiere una gran superficie específica (entre 500-1000 m²/g). (Hüsing & Schubert, 1998)

Baja conductividad térmica

- Debido a su estructura porosa, los aerogeles tienen una conductividad térmica muy baja, entre 0.01-0.03 W/m·K, lo que los convierte en excelentes aislantes térmicos. (Hüsing & Schubert, 1998)

Transparencia óptica

- Algunos aerogeles, como los de sílice, pueden ser transparentes y translúcidos, permitiendo el paso de la luz visible.

Fragilidad

- A pesar de su baja densidad, los aerogeles son materiales relativamente frágiles y quebradizos, lo que limita algunas de sus aplicaciones.

6.2.3. Tipos

Aerogeles de sílice

- Los aerogeles de sílice son los más comunes y versátiles. Se utilizan ampliamente en aplicaciones como aislamiento térmico, filtración, catálisis y sensores. Tienen baja densidad, alta porosidad y superficie específica, y excelentes propiedades térmicas y acústicas. (Gállego, 2016)

Aerogeles de carbono

- Se utilizan como electrodos de desionización capacitiva (CDI) para la desalinización de agua. Tienen propiedades adecuadas como alta superficie específica, porosidad y conductividad eléctrica, lo que los hace eficaces para el proceso de CDI. (Gállego, 2016)

Aerogeles poliméricos

- Existen diversos tipos de aerogeles poliméricos, tanto polímeros sintéticos (poliacrilonitrilo, poliuretano, etc.) como naturales (celulosa, quitosano, etc.). Se utilizan en aplicaciones como aislamiento térmico, absorción de contaminantes, liberación controlada de fármacos y soporte para catalizadores. (Adamez & Baldemar, 2011) (Gállego, 2016)

Aerogeles híbridos

- Los aerogeles híbridos combinando dos o más componentes para obtener propiedades mejoradas, Estos materiales tienen aplicaciones en electrodos, catálisis y adsorción. (Gállego, 2016)

6.3.ADSORCIÓN

La adsorción es un **proceso fisicoquímico** en el cual átomos, moléculas o iones de una fase (generalmente gaseosa o líquida) se adhieren a la superficie de un sólido **adsorbente**.

6.3.1. Características Principales

Elementos fundamentales

- Adsorbato: Sustancia que se adhiere
- Adsorbente: Material sólido con superficie receptora
- Interfase: Zona de contacto entre ambos

Tipos de Adsorción

Adsorción Física (Fisisorción)

La adsorción física, también conocida como fisisorción, es un proceso de adhesión de moléculas de gas o vapor a la superficie de un sólido mediante Fuerzas de Van der Waals. (Gregg & Sing, 1982; Ruthven, 1984).

Adsorción Química (Quimisorción)

La quimisorción es un proceso de adsorción que implica una interacción química entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, caracterizada por la formación de enlaces químicos. (Atkins & de Paula, 2014; Foo & Hameed, 2010).

Factores que influyen en la adsorción

- Temperatura
- Presión
- Área superficial del adsorbente
- Naturaleza química del adsorbente
- Concentración del adsorbato

6.3.2. Cinética de adsorción

La cinética de adsorción estudia la velocidad a la que ocurre el proceso de adsorción y la evolución temporal de la cantidad de adsorbato retenido en la superficie de un adsorbente, desde el inicio del proceso hasta que se alcanza el equilibrio. Este análisis se basa en la relación entre la cantidad adsorbida y el tiempo, así como en la determinación de la velocidad de adsorción (da/dt), la cual disminuye progresivamente hasta anularse cuando el sistema alcanza el estado de equilibrio. La curva cinética de adsorción obtenida describe directamente las propiedades difusionales del adsorbato dentro de la porosidad del adsorbente y permite evaluar

el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones controladas de presión. (Kayser, 1881; Von Giesen, 1903).

La cinética de adsorción es fundamental para comprender no solo la capacidad de un material, sino también la velocidad y mecanismo con que ocurre el proceso. En los aerogeles de taninos sintetizados, la rapidez con que los gases CO₂ y CH₄ se adsorben/desorben está directamente relacionada con el tipo de porosidad y la accesibilidad de los sitios activos.

6.3.3. Modelos cinéticos más utilizados

Modelo de pseudo-primer orden (Lagergren, 1898)

Este modelo asume que la velocidad de ocupación de los sitios de adsorción es proporcional al número de sitios vacantes. (Wang & Guo, 2020) Su ecuación linealizada es:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

Donde:

- . q_t = cantidad adsorbida en el tiempo t (mmol/g)
- . q_e = cantidad adsorbida en equilibrio (mmol/g)
- . k_1 = constante cinética de primer orden (1/min)

Suele aplicarse a sistemas donde la adsorción ocurre rápidamente en la superficie externa.

Modelo de pseudo-segundo orden (Ho & McKay, 1999)

Este modelo considera que la adsorción depende de la interacción entre adsorbato y superficie activa, y que el control principal está en la quimisorción o interacciones específicas. (Vareda et al., 2023) Su ecuación es:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

Donde k_2 es la constante de velocidad de segundo orden ($\text{g} \cdot \text{mmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) Este modelo suele ajustarse mejor en adsorbentes de origen natural, como taninos, porque considera superficies heterogéneas y reactividad química.

Modelo de difusión intraparticular (Weber–Morris, 1963)

Permite evaluar si la velocidad está limitada por la **difusión dentro de los poros** del sólido (Vareda et al., 2023) :

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C$$

- q_t = cantidad de adsorbato adsorbido en el tiempo t (mg/g)
- k_{id} = constante de difusión intraparticular ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2}$)
- t = tiempo de contacto (min)
- C = constante relacionada con el espesor de la capa límite (mg/g)

Donde k_{id} es la *constante de difusión* intraparticular y C indica el espesor de la capa límite.

Si la gráfica de q_t vs $t^{1/2}$ es lineal y pasa por el origen, la difusión intraparticular controla todo el proceso. Si no, hay resistencia en la superficie externa o varias etapas de control.

Modelo de Elovich

Describe adsorción en superficies heterogéneas, donde la velocidad disminuye exponencialmente a medida que aumenta la cobertura:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$$

Donde α es la velocidad inicial de adsorción y β está relacionada con la extensión de la cobertura. Es útil cuando el sistema no sigue un comportamiento uniforme. (Chien & Clayton, 1980)

7. METODOLOGÍA

7.1. PREPARACIÓN DE LA CORTEZA

Debido a la cercanía y acceso a las instalaciones de CU-BUAP (Figura 2), se recolectaron las cortezas de los árboles de Eucalipto (Figura 3) encontrados en las inmediaciones del jardín botánico de CU.



Figura 2: Vista de CU-BUAP tomada con el programa "Google earth".

Las cortezas fueron tratadas mediante un cepillado simple y lavado con agua destilada, posteriormente fueron secadas en una estufa a 60 °C durante 24 h, trituradas en un mortero y tamizadas con malla No.100 para tener un tamaño de masa uniforme.



Figura 3: Árbol de Eucalipto.

7.2.EXTRACCIÓN DE TANINOS POR SOXHLET

La extracción de taninos se llevó a cabo utilizando un Soxhlet (Figura 4), el cual está conectado a un recirculador. Esta técnica de extracción es reconocida por su eficacia en la extracción de compuestos solubles a partir de materiales vegetales. Para este propósito, se utilizaron 10 gramos de corteza de Eucalipto, previamente tamizados mediante una malla de número 100, lo que garantizó una granulometría uniforme y adecuada para el proceso de extracción.

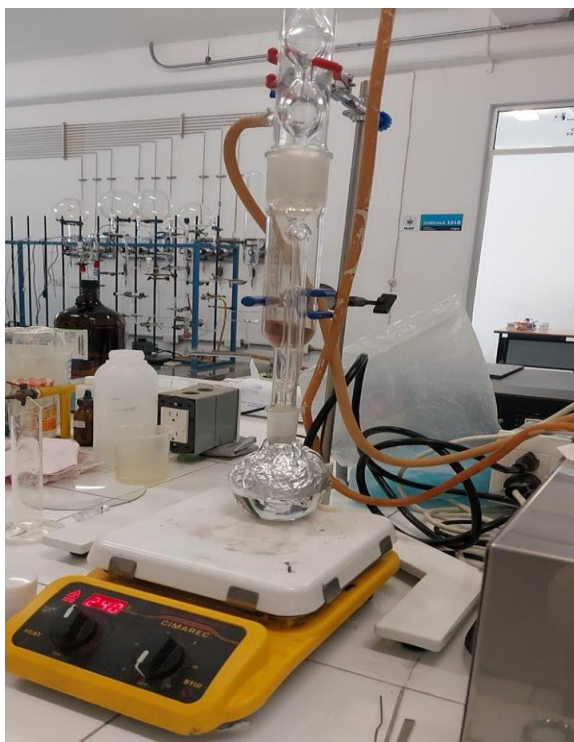


Figura 4. Sistema Soxhlet para extracción de taninos.

Se utilizaron 300 mililitros de agua desionizada como disolvente y se realizaron tres ciclos de extracción consecutivos en un tiempo aproximado de tres horas y media para asegurar la mayor cantidad posible de extracción de taninos. Durante este tiempo, el sistema fue mantenido a una temperatura controlada de 320 °C. Este control térmico es esencial, ya que asegura la eficiencia del proceso y minimiza la degradación térmica de los compuestos extraídos. Posteriormente, el extracto se dejó secar en una estufa a 60 °C por 24 horas para obtener un polvo café con un rendimiento final de 10% aproximadamente.

Para poder presentar de forma clara el proceso, a continuación, se presenta un diagrama de flujo con los pasos detallados.

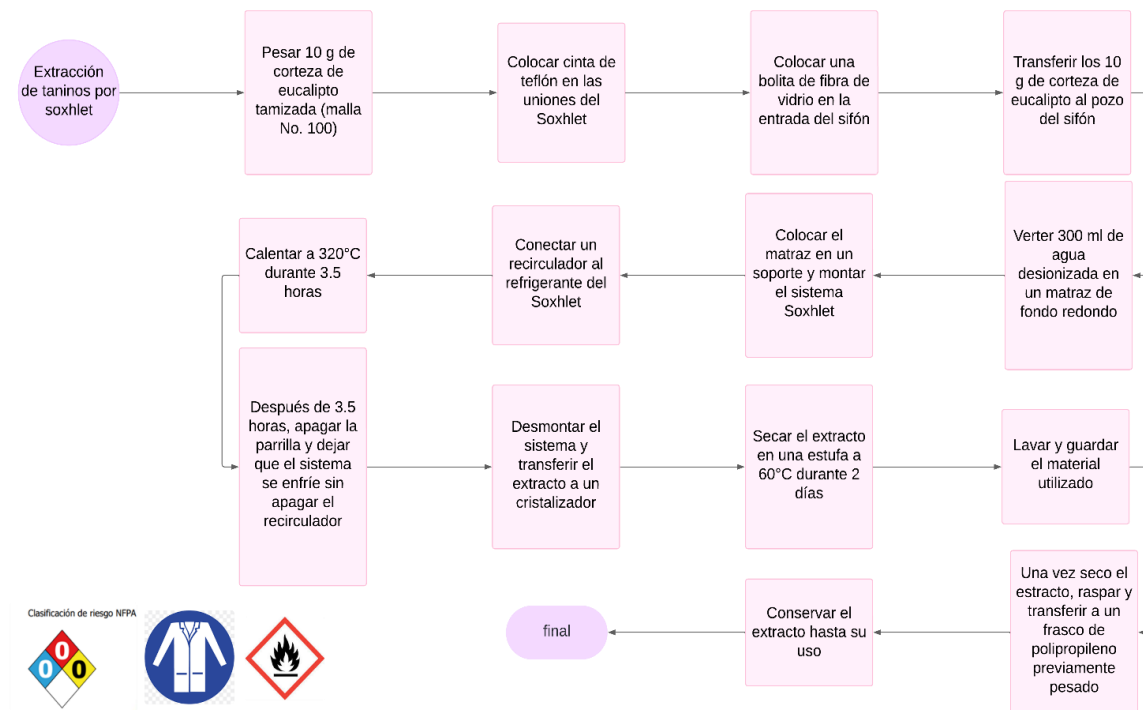


Diagrama 1. Procedimiento para la extracción de taninos

7.3.SÍNTESIS DE GEL

La síntesis por el método sol-gel comprende dos etapas principales que son: la dispersión de partículas sólidas de tamaño coloidal en una fase líquida (formación de un sol) y la gelificación del sol; aunque se utilizan también otras variantes como son: hidrólisis y condensación de los alcóxidos precursores, seguidos por un envejecimiento del gel y un secado en condiciones ambientales. (Gutiérrez et al., 2011)

7.3.1. Procedimiento

Para la síntesis del gel se preparó una disolución inicial de extracto de taninos al 11% pesando 1.1 g de extracto y disolviéndolo en 10 mL de agua desionizada, agitando de forma constante. Cabe señalar que se pudo observar que una parte de este extracto no es soluble, por lo que se filtran estos sólidos y mediante una pesada por diferencia en el papel filtro se determina

que la concentración real de la disolución era 7%. Con esta disolución se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando diferentes relaciones de extracto de corteza de Eucalipto y $\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}_3$, conocido como “water glass” o “vidrio soluble”, el cual es un agente aglutinante y floculante. El volumen de taninos usado de forma constante fueron 2 mL, lo que representa 0.14 g de taninos y con base en esta masa se calculó el volumen de $\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}_3$ necesario para hacer las pruebas con las diferentes relaciones en masa de taninos: masa de $\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}_3$, las cuales variaron desde 1:0.64 hasta 1:6.2 como puede observarse en la Tabla 2

Tabla 2. Relaciones usadas para síntesis del gel

Taninos (ml)	Taninos m (g)	$\text{Na}_2\text{Si}_8\text{O}_{70}\text{Si}_3$ V (μL)	$\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}_3$ m (g)	Relación Taninos: $\text{Na}_2\text{O}_7\text{Si}_3$
2	0.14	63	0.09	1: 0.64
2	0.14	126	0.18	1: 1.25
2	0.14	189	0.27	1: 1.90
2	0.14	251	0.35	1: 2.50
2	0.14	314	0.43	1: 3.10
2	0.14	377	0.52	1: 3.70
2	0.14	440	0.61	1: 4.40
2	0.14	503	0.70	1: 5.00
2	0.14	566	0.78	1: 5.60
2	0.14	629	0.87	1: 6.20

El tiempo requerido para la formación del sol-gel osciló entre 5 y 20 minutos, dependiendo de la proporción entre el extracto de eucalipto y el silicato de sodio. Con base en el análisis de la literatura y en los resultados experimentales, se determinó que la proporción óptima era de 1:0.64. Esta relación fue seleccionada como la más adecuada debido a que

permitió un tiempo de reacción cercano a los 5 minutos, además de generar geles con una consistencia adecuada durante los ensayos preliminares.

Las muestras sintetizadas fueron dejadas a temperatura ambiente durante tres horas para permitir la curación completa del sol-gel. Este paso fue crucial para asegurar la estabilidad y la integridad estructural del material sintetizado. Se almacenaron en un lugar fresco y seco hasta que se requirieron para etapas posteriores o análisis.

Durante la etapa de envejecimiento del gel, se empleó alcohol absoluto. Este procedimiento se llevó a cabo en frascos de polipropileno, donde se adicionaron 5 mL de alcohol absoluto a temperatura ambiente, asegurando una distribución homogénea del alcohol en el gel. Esta operación se repitió tres veces consecutivas, con un tiempo de reposo de 15 minutos para cada adición. El propósito fundamental del envejecimiento es optimizar y consolidar la estructura mecánica del gel. Este proceso facilita la eliminación de residuos de precursores y agua, elementos que podrían comprometer la integridad del material. Además, el envejecimiento promueve una mayor reacción de condensación, lo que resulta en un incremento significativo del entrecruzamiento entre las cadenas poliméricas del gel. Este entrecruzamiento es crucial, ya que refuerza la estructura interna del gel, mejorando su resistencia y durabilidad. Otro de los objetivos de esta etapa es aumentar la permeabilidad de la estructura del gel. Esto se logra mediante la reorganización de los poros dentro de la matriz, lo que permite una mayor circulación de fluidos a través del gel, optimizando su funcionalidad en aplicaciones posteriores. Al finalizar los lavados con alcohol, el material se dejó secar por 24 h a 65 °C. Este paso fue fundamental para permitir la evaporación gradual del solvente, facilitando así la conformación estructural del gel. La estabilidad térmica y la ausencia de fluctuaciones en la temperatura fueron esenciales para asegurar que el gel se formara de manera uniforme y sin defectos estructurales.

7.4.SÍNTESIS DEL AEROGEL

La fase final de la síntesis es considerada la más crítica y determinante para la calidad del producto final. El material sintetizado se colocó en un reactor de vidrio mostrado en la Figura 5. El proceso se realizó bajo condiciones controladas para asegurar la eliminación completa de los disolventes de enjuague y el desarrollo adecuado de las propiedades del material para garantizar la estabilidad y la integridad estructural del gel sintetizado.



Figura 5. Reactor de vidrio.

El reactor de vidrio fue colocado en un sistema catalítico (Diagrama 2), el cual consta de un horno con flujo de N_2 controlado, donde el gel se sometió a un proceso de calentamiento controlado. La temperatura se incrementó a una tasa de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por minuto alcanzando un máximo de $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este tratamiento térmico se llevó a cabo con el objetivo de eliminar la mayor cantidad posible de agua y solventes residuales que pudieran estar presentes en la matriz del gel. Una vez alcanzada la temperatura final, el material se mantuvo a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante dos horas, garantizando la descomposición completa de los componentes volátiles y la estabilización de la estructura, posteriormente se dejó enfriar de manera gradual bajo flujo de N_2 constante de 100 mL/min usando un controlador de temperatura (Figura 6) hasta temperatura ambiente. Este flujo de gas inerte aseguró que el material no sufriera oxidaciones, ni reacciones indeseadas durante el tratamiento térmico, preservando así sus propiedades físicas y químicas.

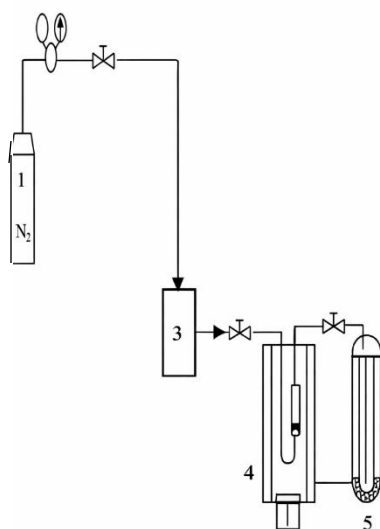


Diagrama 2. Sistema catalítico para síntesis de aerogel, donde: 1- tanque de N_2 , 2- mezclador, 3- reactor, 4- horno, 5- absorbedor.



Figura 6. Controlador de temperatura del sistema catalítico.

7.5. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

Las cinéticas fueron obtenidas en un sistema volumétrico al alto vacío construido con vidrio Pyrex y equipado con válvulas libres de grasa. El alto vacío (< 0.01950 Pa) fue logrado usando una bomba Balzers TSH 062 y la presión fue registrada usando dos tipos de transductores de presión en rangos diferentes: TPR 017 (133.32×10^{-4} a 666.612 Pa) y APR 011 (133.32 a 1.01325×10^5 Pa). Antes del experimento muestras de 0.1 g fueron calentadas durante 24 horas a 300 °C y posteriormente estabilizada durante 1 h a la temperatura del análisis. Los experimentos a 40 °C se controlaron mediante un ultratermostato de agua Haake L, con una precisión de ± 0.15 °C. Los experimentos a 0 °C fueron controlados con un baño de hielo. La cantidad de gas adsorbido (mmol/g) fueron referenciados a 1 g de adsorbente deshidratado, con la evaluación de pérdida de peso siendo previamente evaluada al calentar la muestra a 300 °C a

presión atmosférica en un horno. La adsorción de gases en función del tiempo fue obtenida con base en la diferencia entre la cantidad de gas inicial introducida en el portamuestras y la cantidad de gases que quedan al final desde el tiempo inicial ($t_i=0$) hasta el tiempo de equilibrio de cada muestra ($t_f=10800s$). Durante las mediciones de cinéticas, la disminución de presión en el sistema fue monitoreado de forma manual comenzando con una presión cercana a los 450.04 Torr.

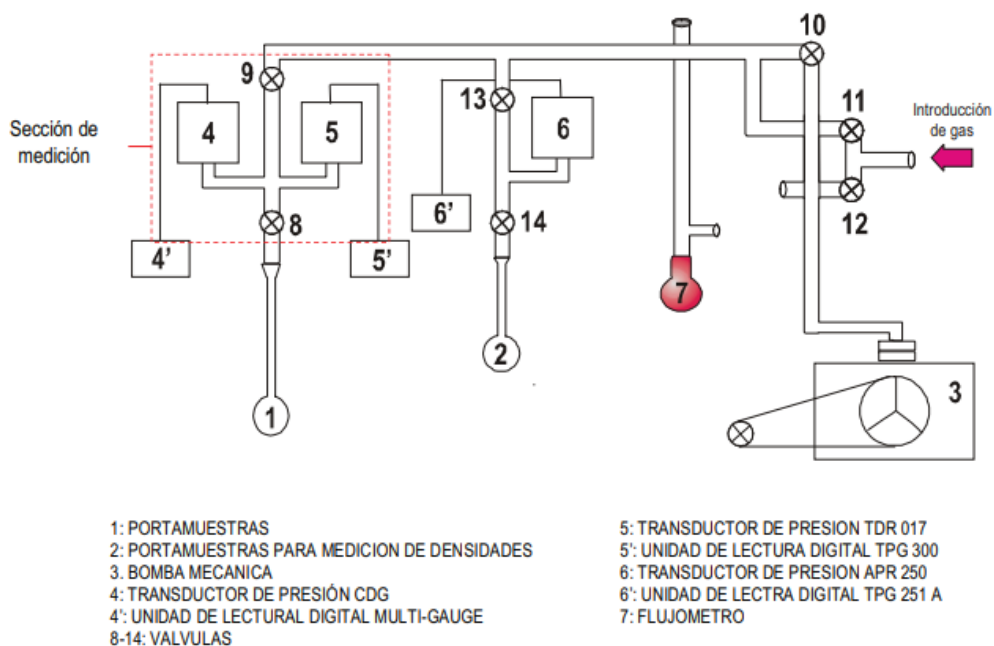


Figura 7. Representación esquemática del sistema volumétrico empleado.

7.6. CINÉTICA DE ADSORCIÓN TOTAL

Una vez activado el adsorbente y estabilizada la temperatura de medición, el gas fue introducido en el área de medición manteniendo cerrada la válvula 8 hasta alcanzar la presión inicial deseada (≈ 450 Torr); posteriormente, la válvula 9 fue cerrada para aislar el volumen de medición. El experimento inició al abrir la válvula 8, permitiendo el contacto entre el gas y el adsorbente. A partir de este momento se registraron los tiempos y la disminución de la presión en el sistema en el intervalo comprendido entre 0 s y 10 800 s, o hasta alcanzar el estado de equilibrio.

La cantidad total de gas adsorbido se determinó a partir de la diferencia entre la cantidad de gas inicialmente introducida y la cantidad de gas residual en el sistema al equilibrio, calculándose mediante la ley de los gases ideales; se calcula la cantidad de gas adsorbido (mmol/g) y posteriormente ésta se divide entre la cantidad de adsorbente que está disponible en el

portamuestras, obteniendo de esta manera la cantidad de gas adsorbido correspondiente a cada tiempo de medición

7.7. CINÉTICA DE ADSORCIÓN REVERSIBLE

Una vez alcanzado el equilibrio correspondiente a la cinética de adsorción total, el sistema fue sometido nuevamente a alto vacío mediante la apertura controlada de las válvulas correspondientes, manteniendo la misma temperatura experimental, con el fin de remover la fracción de gas débilmente adsorbida. Posteriormente, el procedimiento de medición cinética fue repetido bajo las mismas condiciones experimentales, introduciendo nuevamente el gas y registrando la variación de la presión en función del tiempo en el intervalo comprendido entre 1 s y 10 800 s, hasta alcanzar el estado de equilibrio.

La diferencia entre la cantidad de gas adsorbido obtenida en la cinética total y la correspondiente a la cinética reversible fue asociada a la fracción de adsorción irreversible, la cual corresponde al gas que no es posible desorber a la temperatura de trabajo.

8. DISCUSION DE RESULTADOS

8.1. CARACTERIZACIÓN

8.1.1. Espectroscopía de Infrarrojo (IR)

La espectroscopía infrarroja (IR) es una técnica analítica que se basa en la absorción de radiación infrarroja por los enlaces químicos de una molécula, provocando transiciones vibracionales características (estiramientos y deformaciones). Cada tipo de enlace y grupo funcional absorbe la radiación a frecuencias específicas, generando un espectro que actúa como una "huella digital" molecular.

Los análisis de IR fueron efectuados en un espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR digilab modelo Scimitar utilizando pastillas de KBr como soporte, el cual fue secado en estufa a 100°C durante 24 horas previas al análisis.

En el caso de los taninos (compuestos polifenólicos), la técnica IR permite identificar grupos funcionales clave como:

- Grupos hidroxilo (-OH), típicos de los fenoles, con bandas anchas alrededor de $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$.
- Vibraciones aromáticas $\text{C}=\text{C}$ del anillo bencénico, observables entre $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$.
- Enlaces C-O en éteres o enlaces glucósidos, visibles entre $1000\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$.
- Enlaces Si-O-Si en silicatos debido a su estiramiento asimétrico entre $1000\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$.

En la Figura 8a) se muestra el espectro IR del gel formado con el extracto de taninos y el reactivo de silicato de sodio como agente gelificante, en donde se identifican las vibraciones de los grupos O-H en 3422 cm^{-1} , $\text{C}=\text{C}$ en 1620 cm^{-1} y la banda reportada para la vibración de los grupos Si-O en 1090 cm^{-1} , demostrando la incorporación adecuada del agente gelificante a la estructura del material. Con base en la ausencia de la banda de carbonilo alrededor de 1700 cm^{-1} y la presencia clara de la banda de $\text{C}=\text{C}$ aromático ($\sim 1620\text{ cm}^{-1}$), el espectro sugiere la probabilidad de que el gel contenga taninos condensados, como era de esperarse debido a la acción del agente gelificante. (Carrasco, 2014).

La Figura 8b) muestra el aerogel obtenido después del proceso térmico y antes de los enjuagues con medio ácido o básico. Se observa la disminución en la intensidad del pico asignado a los grupos O-H en 3477 cm^{-1} , debido al secado a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se han eliminado todos los disolventes/agua residual y solo permanecen los grupos pertenecientes a la molécula de taninos, mientras que la banda asignada a silicatos se desplaza a 1041 cm^{-1} y se hace más intensa indicando que estos grupos permanecen en el material.

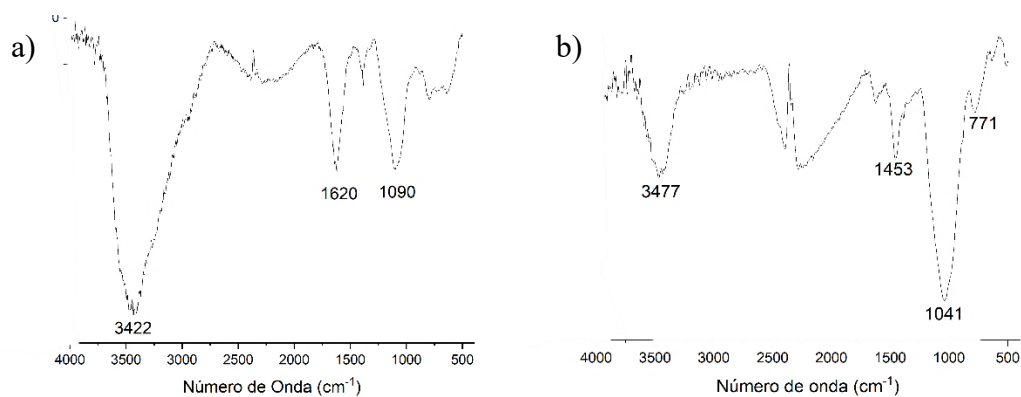


Figura 8. Espectro de IR de: a) el gel y b) el aerogel obtenidos.

Esta técnica es especialmente útil para diferenciar los cambios que se dan en los grupos cuando se lava el aerogel en medio ácido o básico para eliminar a los grupos silicato. En la Figura 9 se muestra una comparación de los espectros de IR de: a) el aerogel después del lavado con HF y b) el aerogel después del lavado con NaOH.

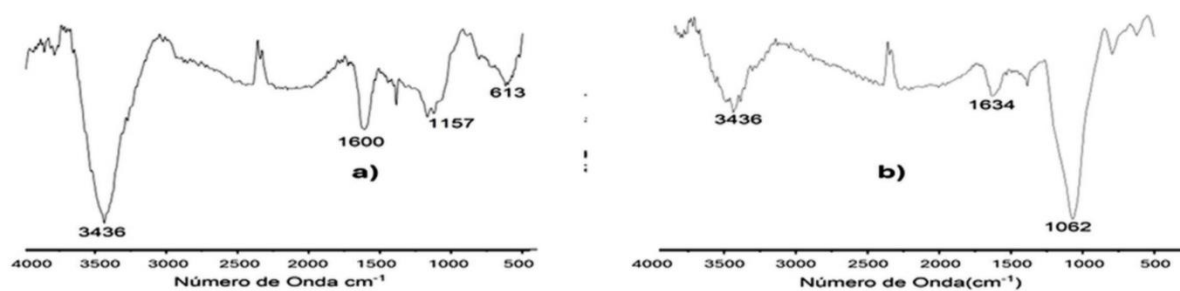


Figura 9. Espectros de IR de a) aerogel lavado con HF al 40% y b) aerogel lavado con NaOH 2M.

En el espectro a), se observa que la banda ubicada en 1041 cm^{-1} , atribuida al estiramiento asimétrico del enlace Si–O–Si, prácticamente ha desaparecido. Esta disminución drástica en la intensidad indica que el tratamiento con HF logró remover de forma eficiente la mayor parte de los grupos silicato presentes en la matriz del aerogel. El HF es conocido por su capacidad para disolver la sílice, lo que sugiere que este lavado permitió liberar los poros ocupados por la red

inorgánica, favoreciendo así una estructura más abierta y posiblemente con mayor superficie específica, como se discutirá más adelante con los resultados de SEM.

En contraste, en el espectro b) correspondiente al material tratado con NaOH 2 M, se mantiene una banda intensa en 1062 cm^{-1} , también asociada al enlace Si–O–Si. Esto indica que el tratamiento alcalino no fue suficiente para eliminar completamente los grupos silicato. La persistencia de esta señal sugiere que gran parte de la red silícea permanece en el material, lo que se traduce en una estructura menos abierta y con menor porosidad efectiva.

Estas observaciones espectroscópicas se ven respaldadas por los resultados obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y los ensayos de adsorción, donde se evidencia una mayor porosidad y estructura más desarrollada en el material tratado con HF en comparación con el tratado con NaOH. Estos hallazgos se discutirán con mayor detalle más adelante.

8.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: *Scanning Electron Microscopy*) es una técnica de caracterización que utiliza un haz de electrones en lugar de luz para generar imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra. Es ampliamente utilizada en ciencia de materiales, química, biología y nanotecnología para observar morfología, textura superficial y microestructura. Los análisis se realizaron con un microscopio TESCAN MAIA3 UHR-FESEM trabajando a 5 kV.

En el caso de los materiales sintetizados en el presente proyecto, esta técnica ayudó a identificar la calidad de la superficie del material antes y después del lavado con medio ácido (HF) y básico (NaOH). En la Figura 10 podemos observar la imagen de la superficie del material previo al lavado con un aumento de 500 veces, donde se observa una superficie compacta y densa con características de un material rugoso, irregular, heterogéneo, sin poros y con algunos aglutinamientos posiblemente por la interacción del reactivo “water glass”, que es la fuente de los silicatos con el extracto de taninos. Esta imagen pone en evidencia la importancia del lavado para la obtención del material poroso adecuado para la aplicación de adsorción de gases.

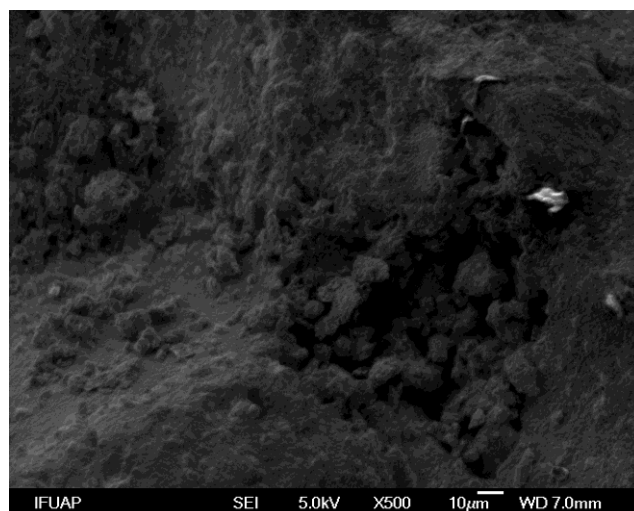


Figura 10. Imagen del aerogel sin tratar.

En la Figura 11 se observan las imágenes del material lavado con HF aumentado a una resolución de aumento de a) 500 veces y b) 100 veces, donde es posible ver de forma clara el efecto del tratamiento del medio ácido sobre la porosidad del material al eliminar los grupos silicato. El material se observa ahora con una superficie homogénea y porosa adecuada para la adsorción como se discutirá más adelante.

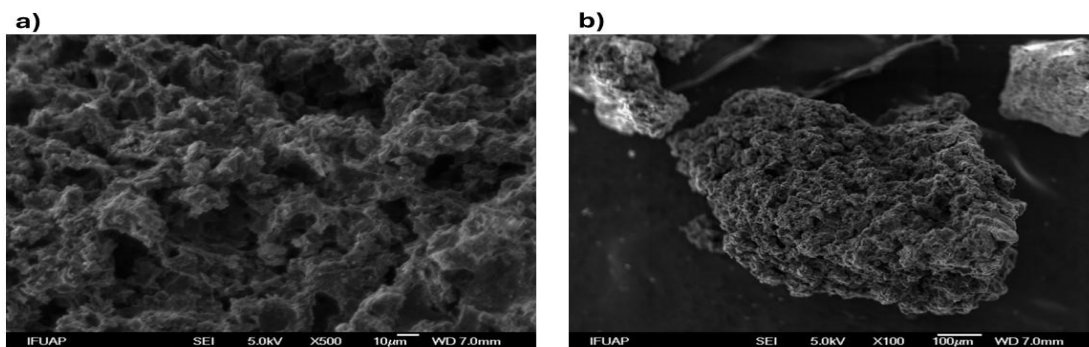


Figura 11. Imagen por SEM de la superficie del aerogel lavado con HF, donde: a) aumento de 500 veces, b) aumento de 100 veces.

De forma similar, en la Figura 12 podemos observar la imagen generada en SEM del material lavado con NaOH con un aumento de 100 (Figura 12a), 500 (Figura 12b) y 1000 veces

(Figura 12c). A diferencia del material lavado con HF, se puede observar que, aunque el material generado es homogéneo y poroso, no se observa con la misma cantidad de poros, por lo que el NaOH 2M no es adecuado para retirar por completo a los silicatos, lo que concuerda con el análisis de IR y por lo tanto se espera que el material generado sea menos eficiente para la adsorción de gases.

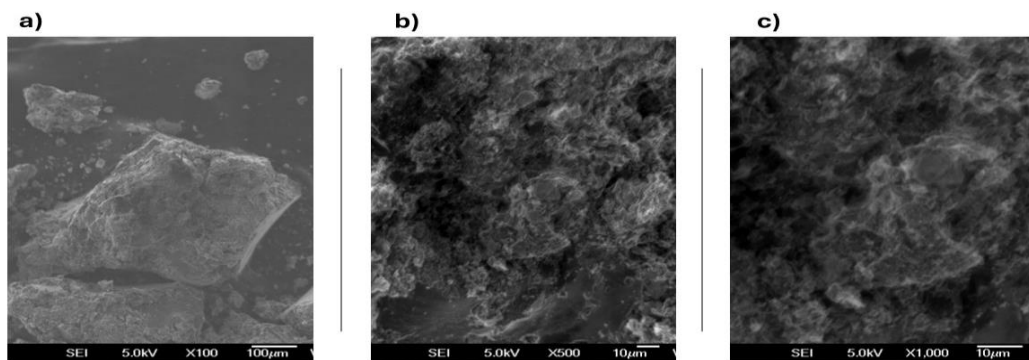


Figura 12. Imagen por SEM de la superficie del aerogel lavado con NaOH, donde: a) aumento de 100 veces, b) aumento de 500 veces, c) aumento de 1000 veces.

8.1.3. Cinéticas de adsorción

Cinéticas de adsorción-desorción de CO₂ y CH₄ fueron obtenidas a 0 °C, 20 °C y 40 °C para los tres materiales: a) material sin tratar, b) material lavado con HF y c) material lavado con NaOH. Las cinéticas fueron obtenidas en un sistema volumétrico al alto vacío construido con vidrio Pyrex y equipado con válvulas libres de grasa. El alto vacío (< 0.01950 Pa) fue logrado usando una bomba Balzers TSH 062 y la presión fue registrada usando dos tipos de transductores de presión en rangos diferentes: TPR 017 (133.32 x 10⁻⁴ a 666.612 Pa) y APR 011 (133.32 a 1.01325 x 10⁵ Pa). Antes del experimento muestras de 0.1 g fueron calentadas durante 24 horas a 300 °C y posteriormente estabilizada durante 1 h a la temperatura del análisis. Los experimentos a 40 °C se controlaron mediante un ultratermostato de agua Haake L, con una precisión de ± 0.15 °C. Los experimentos a 0°C fueron controlados con un baño de hielo. La cantidad de gas adsorbido (mmol/g) fueron referenciados a 1 g de adsorbente deshidratado, con la evaluación de pérdida de peso siendo previamente evaluada al calentar la muestra a 300 °C a presión atmosférica en un horno. La adsorción de gases en función del tiempo fue obtenida con base en la diferencia entre la cantidad de gas inicial introducida en el portamuestras y la cantidad de gases que quedan al final desde el tiempo inicial (ti=0) hasta el tiempo de equilibrio de cada muestra. Durante las mediciones de cinéticas, la disminución de presión en el sistema fue monitoreado de forma manual comenzando con una presión cercana a los 450.04 Torr.

En la Figura 13 se presentan las cinéticas para el material lavado con NaOH en la adsorción de CO₂ (Figura 13a) y CH₄ (Figura 13b) a 0 °C, 20 °C y 40 °C para la cinética total (líneas con formas rellenas) y para la cinética reversible (líneas con formas vacías). Para ambos gases se observa que la cantidad adsorbida inicial, medida en mmol/g, es mayor a temperatura baja (0 °C), lo cual es consistente con el carácter exotérmico del proceso de adsorción física.

Para el CO₂ (Figura 13a) a 0 °C, la capacidad máxima de adsorción alcanza aproximadamente 2.06 mmol/g, a 20 °C es de 1.43 mmol/g y a 40 °C se reduce a cerca de 1.20 mmol/g, evidenciando que el aumento de temperatura desfavorece la retención de los gases. Se observa que el equilibrio se logra rápidamente (aproximadamente en 1000 s) y la adsorción del gas ocurre de forma rápida, con una fase inicial abrupta durante los primeros 10 segundos. A mayor temperatura, el equilibrio parece alcanzarse más rápido (por ejemplo, la curva a 40 °C se

estabiliza más pronto), lo cual es coherente con una mayor movilidad molecular del CO₂, aunque con menor cantidad adsorbida. Luego de este intervalo, la cantidad adsorbida comienza a estabilizarse, indicando que el sistema ha alcanzado un estado cercano al equilibrio, por lo que se hace una cinética reversible aplicando vacío durante dos horas y repitiendo la cinética bajo las mismas condiciones, donde se observa que el material libera el CO₂ casi con la misma facilidad con que lo adsorbe, lo cual indica un comportamiento típicamente físico. Este perfil cinético sugiere que el material es adecuado para aplicaciones de captura y liberación cíclica de CO₂, especialmente a temperaturas moderadas o bajas. Además, la rápida adsorción inicial podría estar relacionada con una buena accesibilidad de los poros o una alta afinidad superficial por el CO₂, y al mismo tiempo la interacción con los grupos silicato, ya que de acuerdo con el IR estos grupos solo se eliminan de manera parcial con el tratamiento con NaOH liberando los poros suficientes para tener sitios activos.

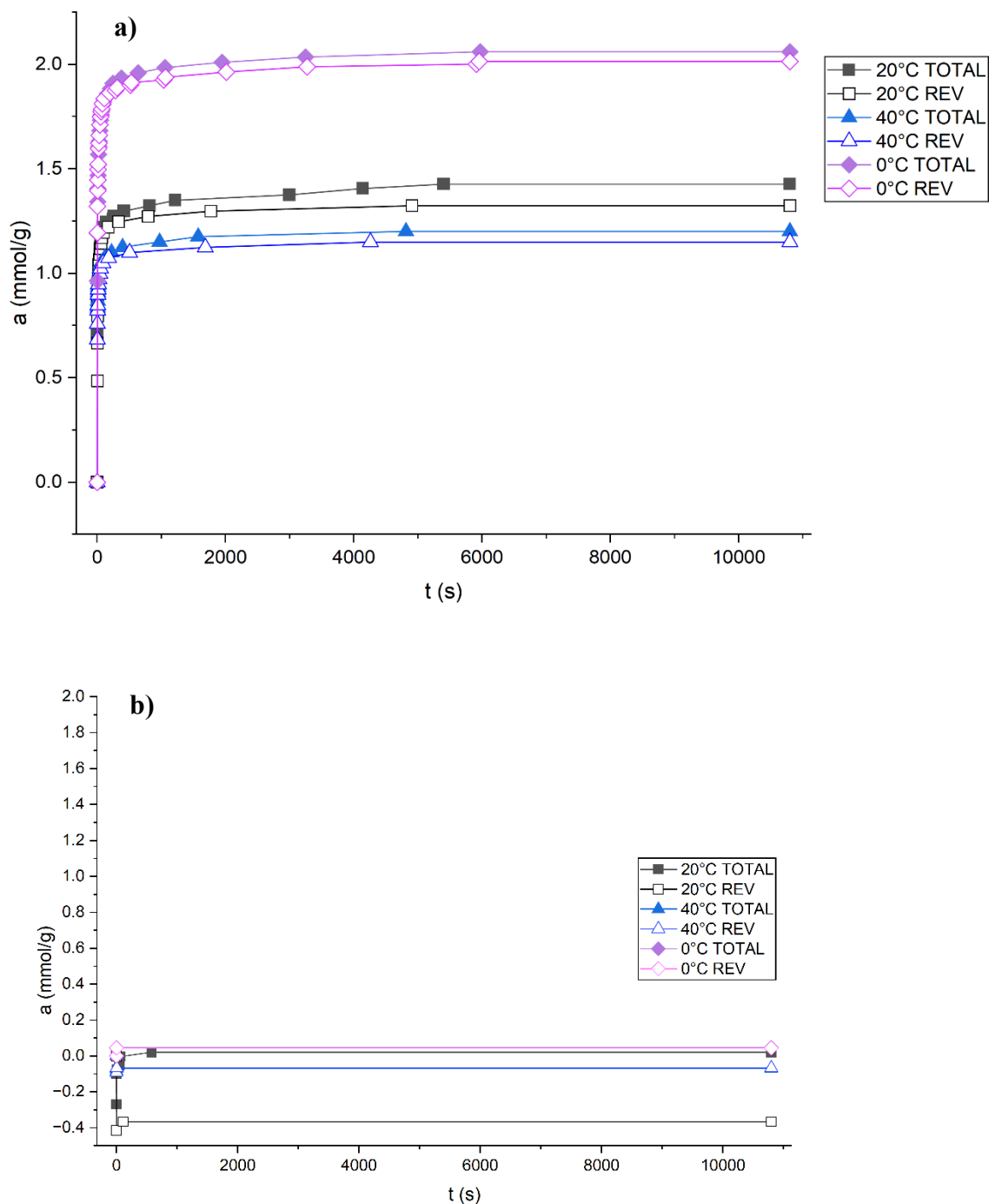


Figura 13. Cinéticas de adsorción a 0, 20 y 40 °C de a) CO_2 y b) CH_4 con el aerogel lavado con NaOH.

Para el CH_4 (Figura 13b) puede observarse que la eficiencia para la adsorción de este gas es menor. En contraste con el comportamiento observado para el CO_2 , la adsorción de CH_4 sobre el material tratado con NaOH es significativamente menor, con capacidades máximas en

alrededor de 0.84 mmol/g a 0 °C, 0.47 mmol/g a 20 °C y 0.35 mmol/g a 40 °C, siguiendo la misma tendencia del CO₂. La cinética de adsorción es igualmente rápida (equilibrio en menos de 1000 s) y el proceso de adsorción es similar al de CO₂, donde el experimento sugiere que el material también puede capturar y liberar CH₄. Aunque, en conjunto, estos resultados sugieren que el material es más adecuado para aplicaciones selectivas de captura de CO₂ en presencia de CH₄, como en procesos de separación o purificación de biogás.

En la Figura 14 se presentan las cinéticas para el material lavado con HF en la adsorción de CO₂ (Figura 14a) y CH₄ (Figura 14b) a 0 °C, 20 °C y 40 °C para la cinética total (líneas rojas) y para la cinética reversible (líneas negras).

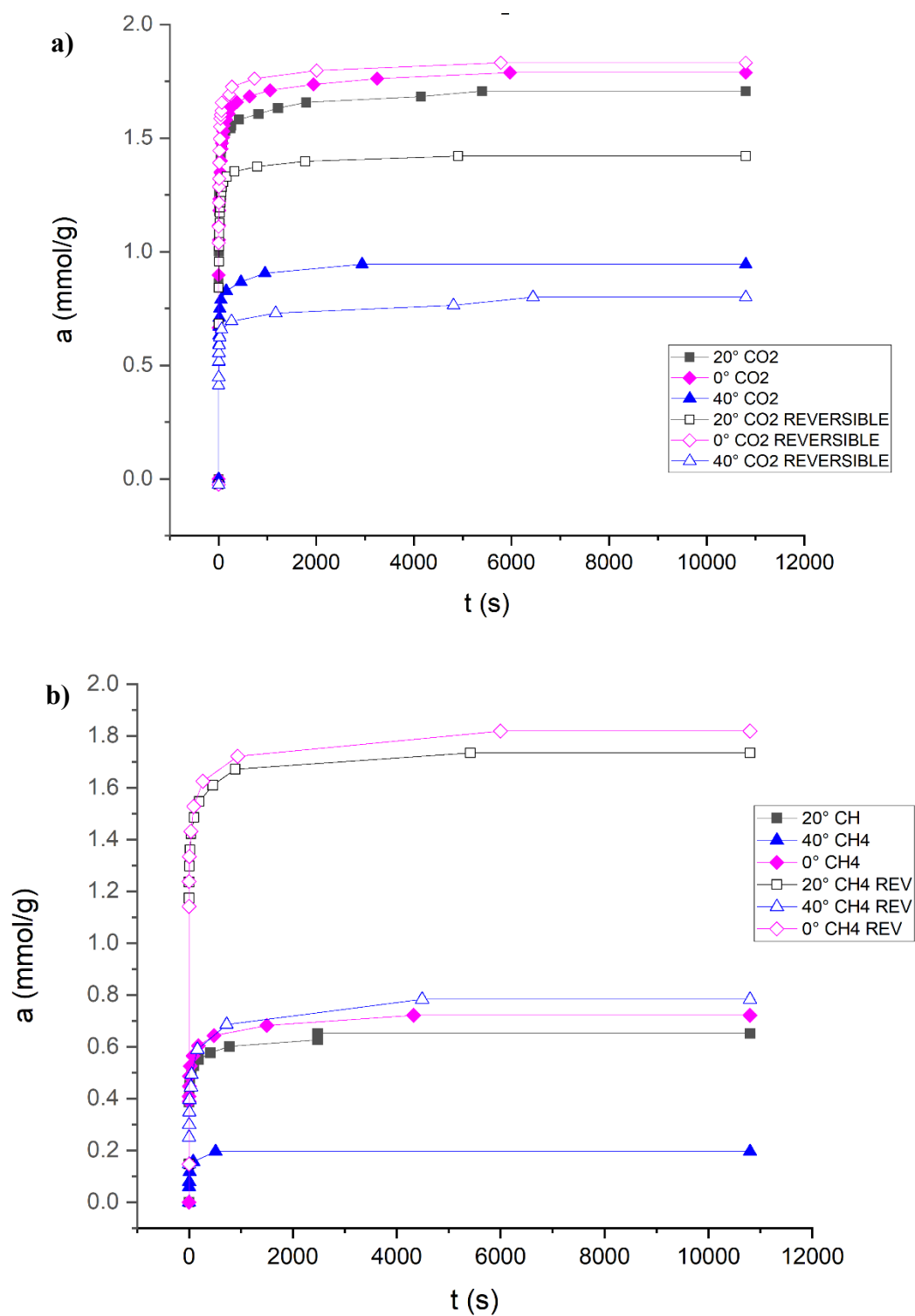


Figura 14. Cinéticas de adsorción de CO_2 a 0, 20 y 40 °C de a) CO_2 y b) CH_4 con el aerogel lavado con HF.

Las cinéticas de este material muestran una tendencia similar a la observada previamente con CO_2 , presentando una mayor adsorción a bajas temperaturas ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$). No obstante, la capacidad de adsorción resulta inferior a la del material lavado con NaOH . En el caso del CO_2 , se registraron valores máximos de 1.79 mmol/g a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1.71 mmol/g a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.95 mmol/g a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; mientras que para CH_4 los valores fueron de 0.72 mmol/g , 0.65 mmol/g y 0.20 mmol/g , respectivamente. Se observa que los procesos son reversibles, lo que también hace a este material apto para la captura, almacenamiento y separación de CO_2 y CH_4 , aunque con una eficiencia inferior a la del material lavado con NaOH .

Finalmente, una cinética de adsorción sobre la muestra sin lavar demostró que el material ocupado totalmente por silicatos no tiene adsorción a las temperaturas probadas ni para CO_2 , ni para CH_4 (Figura 15). Esto es esperado debido a que el material no presenta porosidad alguna, con todos los espacios ocupados por los grupos silicatos, tal como demostraron las imágenes por SEM.

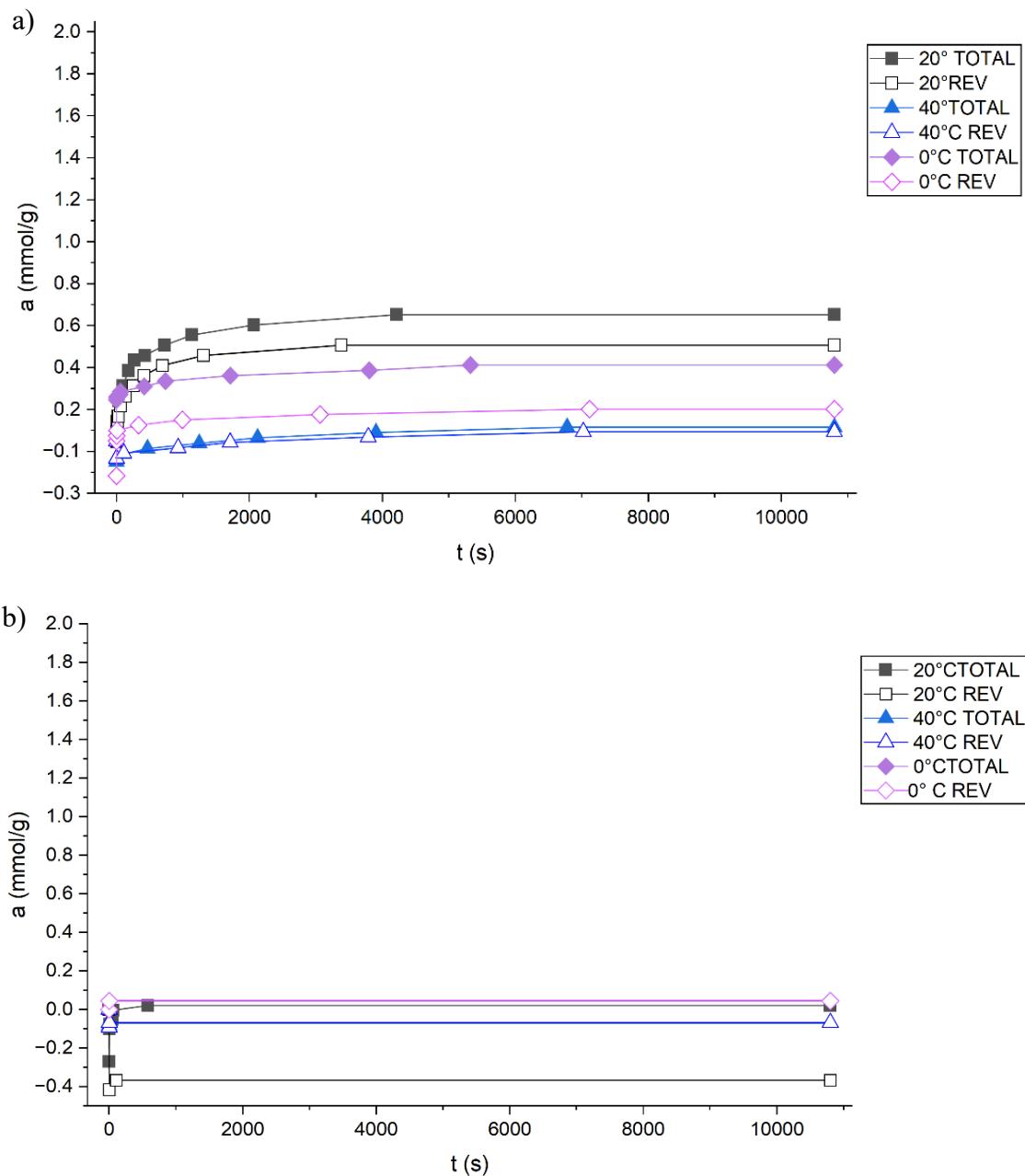


Figura 15. Cinéticas de adsorción de CO_2 a 0, 20 y 40 °C a) CO_2 y b) CH_4 con el aerogel sin lavado.

8.1.4. Ajuste de cinéticas de adsorción a modelos

El análisis de la adsorción de CO_2 y CH_4 en los aerogeles sintetizados requiere del ajuste a modelos cinéticos, ya que estos permiten describir la velocidad del proceso y, al mismo

tiempo, identificar las etapas que lo controlan. En el presente trabajo, modelos de pseudo-primer y pseudo-segundo orden fueron empleados para el ajuste de las cinéticas experimentales, con lo que se observó que el modelo de pseudo-segundo orden (PSO) describe con mayor precisión a estos sistemas porosos de origen natural donde la adsorción está dominada por interacciones químicas superficiales. El modelo fue propuesto por Yuh-Shan Ho y Gordon McKay (1999) y describe procesos donde la etapa limitante está controlada por una interacción química entre el adsorbente y el adsorbato, conocida como quimisorción. A diferencia de la adsorción física, que implica fuerzas de Van der Waals, la quimisorción involucra transferencia o compartición de electrones mediante la formación de enlaces covalentes, iónicos o coordinados entre los sitios activos de la superficie y las moléculas adsorbidas para describir sistemas de adsorción heterogéneos, donde la velocidad de adsorción depende de la ocupación de los sitios activos del adsorbente y del enlace químico entre adsorbato y superficie. El término “pseudo” se usa porque, aunque este modelo considera una reacción química entre el adsorbato y los sitios activos del material, en la práctica solo cambia la concentración del adsorbato. Los sitios activos del adsorbente se mantienen prácticamente constantes durante el proceso, por lo que la cinética se describe como de pseudo-segundo orden.

Para comprobar si se tiene quimisorción como sugiere el modelo de pseudo-segundo orden, se continuó con los ajustes a otros modelos cinéticos y se encontró que las cinéticas también se adecuan al modelo de difusión intraparticular de Weber-Morris. Este modelo proporciona una comprensión más detallada del mecanismo de adsorción al considerar que el proceso no ocurre en una sola etapa, sino que involucra tres fases consecutivas o parcialmente superpuestas: adsorción superficial, difusión intraparticular y equilibrio.

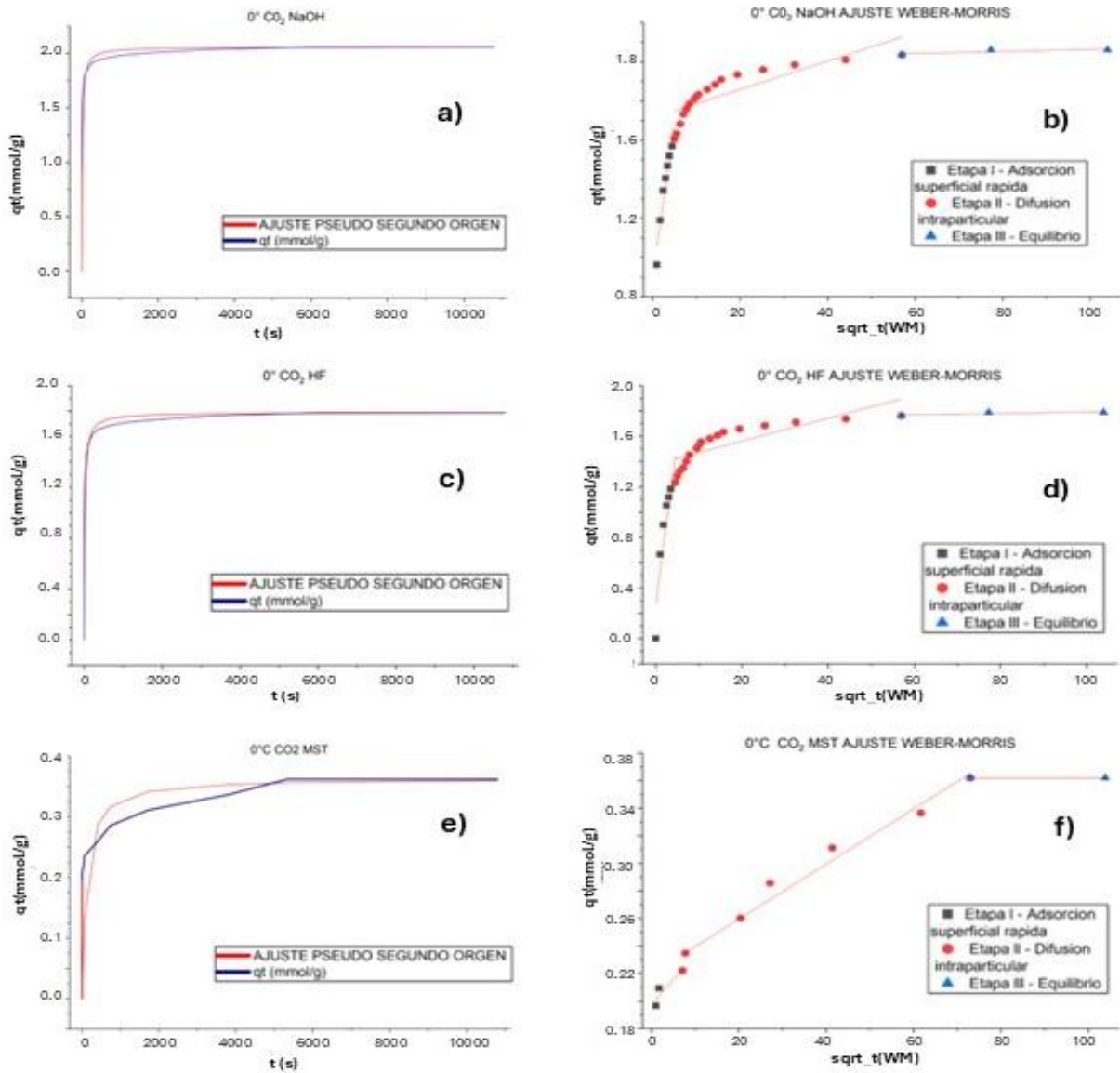


Figura 16. Ajuste de las cinéticas de CO_2 a 0°C con modelos de pseudo-segundo orden (Figura 16a para NaOH, Figura 16c para HF y Figura 16e para la muestra sin tratar, MST) y modelo de Weber-Morris (Figura 16b para NaOH, Figura 16d para HF y Figura 16f para la muestra sin tratar, MST).

En la primera etapa, conocida como adsorción superficial o difusión externa, las moléculas del adsorbato migran desde la fase fluida (gas o solución) hasta la superficie externa del adsorbente. Esta fase suele ser rápida y depende en gran medida de las condiciones de agitación, temperatura y del área superficial disponible.

La segunda etapa corresponde a la difusión intraparticular, donde las moléculas previamente adsorbidas en la superficie comienzan a difundirse a través de los poros del material, avanzando hacia el interior de las partículas. En esta fase, la velocidad del proceso se encuentra limitada por la resistencia a la difusión dentro de la estructura porosa del adsorbente, por lo que su pendiente en la gráfica q_t vs. $t^{1/2}$ suele ser menor.

Finalmente, la tercera etapa representa el equilibrio de adsorción, en el cual la cantidad de adsorbato retenida alcanza un valor máximo y las velocidades de adsorción y desorción se igualan. En esta región, la curva tiende a estabilizarse, indicando que el sistema ha alcanzado su capacidad máxima bajo las condiciones experimentales.

En los materiales estudiados en esta investigación, los ajustes obtenidos al modelo de Weber-Morris permitieron distinguir claramente estas tres etapas, lo que sugiere que el proceso de adsorción está controlado inicialmente por la difusión externa y posteriormente por la difusión intraparticular, hasta llegar al equilibrio. Este comportamiento confirma la naturaleza en varias etapas del fenómeno y permite inferir que la porosidad y la estructura del material desempeñan un papel determinante en la eficiencia del proceso de adsorción. Los resultados correspondientes se presentan en las Figuras 17-21, donde puede observarse la transición progresiva entre las etapas descritas, mientras que en la Tabla 3 se encuentran los parámetros de ajuste a los dos modelos para cada cinética en las tres temperaturas experimentales.

De acuerdo con los coeficientes de correlación (R^2), los datos experimentales de adsorción de CO_2 y CH_4 mostraron un excelente ajuste a los modelos cinéticos evaluados, con valores de R^2 cercanos a la unidad ($R^2 \geq 0.998$). En particular, el modelo de pseudo-segundo orden describió adecuadamente el proceso, lo que sugiere que la adsorción está dominada por interacciones químicas entre el adsorbato y la superficie del adsorbente. Asimismo, el ajuste al modelo de difusión intraparticular de Weber-Morris indica que el mecanismo de adsorción ocurre en múltiples etapas, combinando difusión externa, difusión intraparticular y equilibrio.

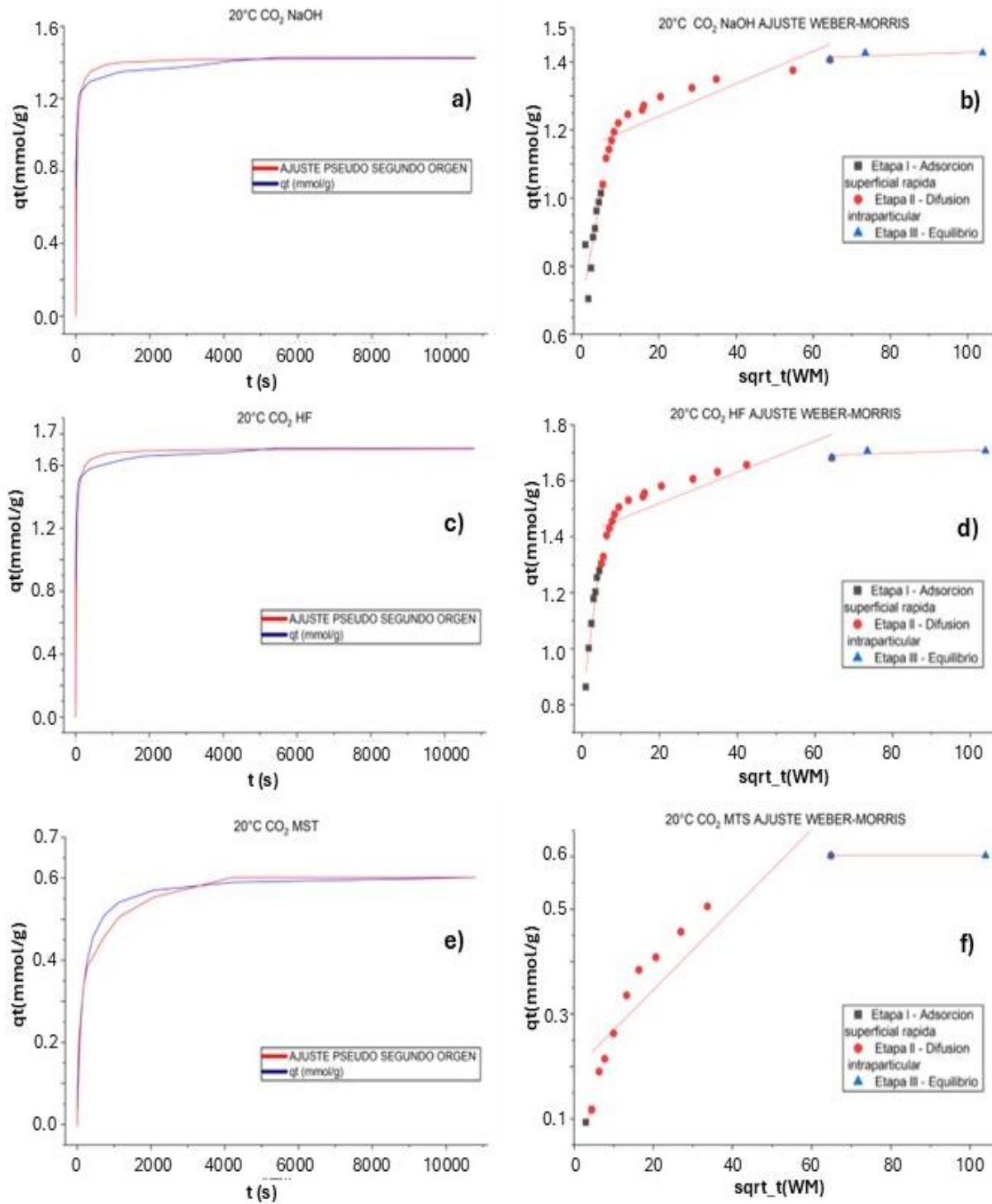


Figura 17. Ajuste de las cinéticas de adsorción de CO₂ a 20 °C mediante el modelo de pseudo-segundo orden (Figura 17a para NaOH, Figura 17c para HF y Figura 17e para la muestra sin tratar, MST) y el modelo de Weber–Morris (Figura 17b para NaOH, Figura 17d para HF y Figura 17f para la muestra sin tratar, MST).

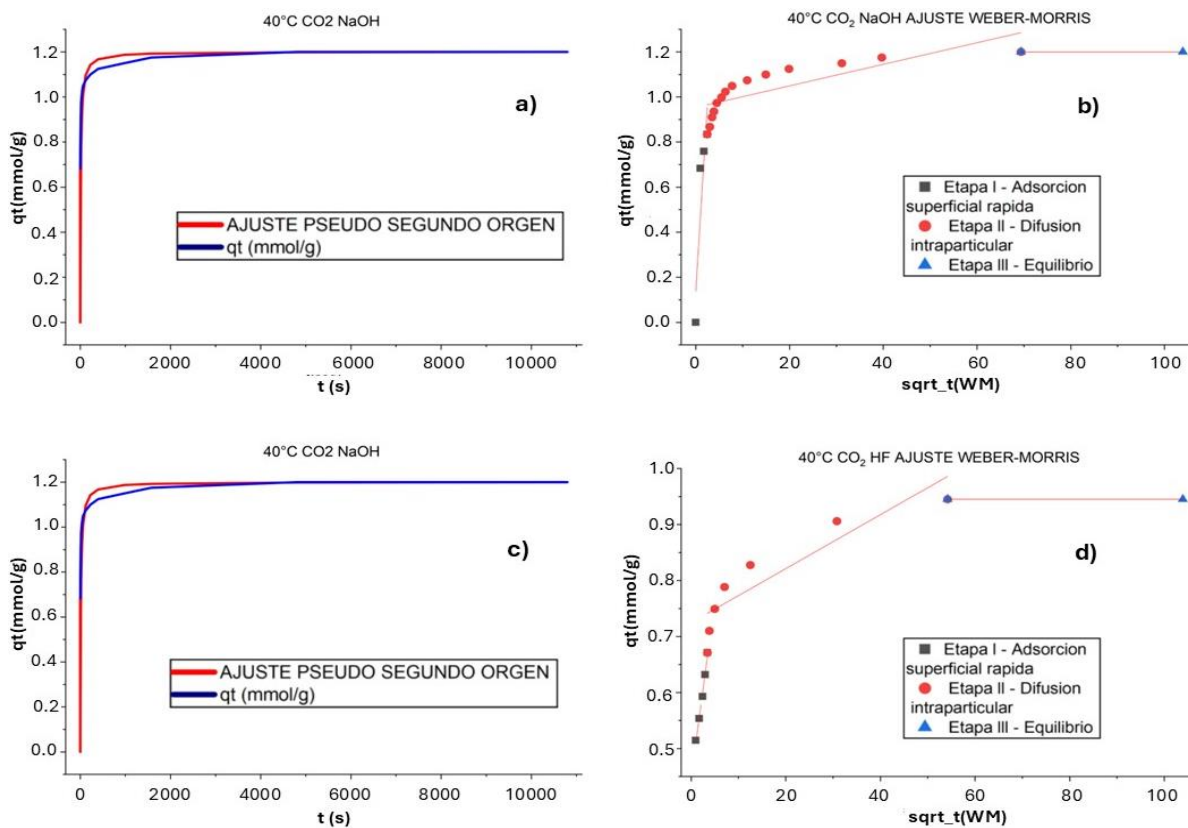
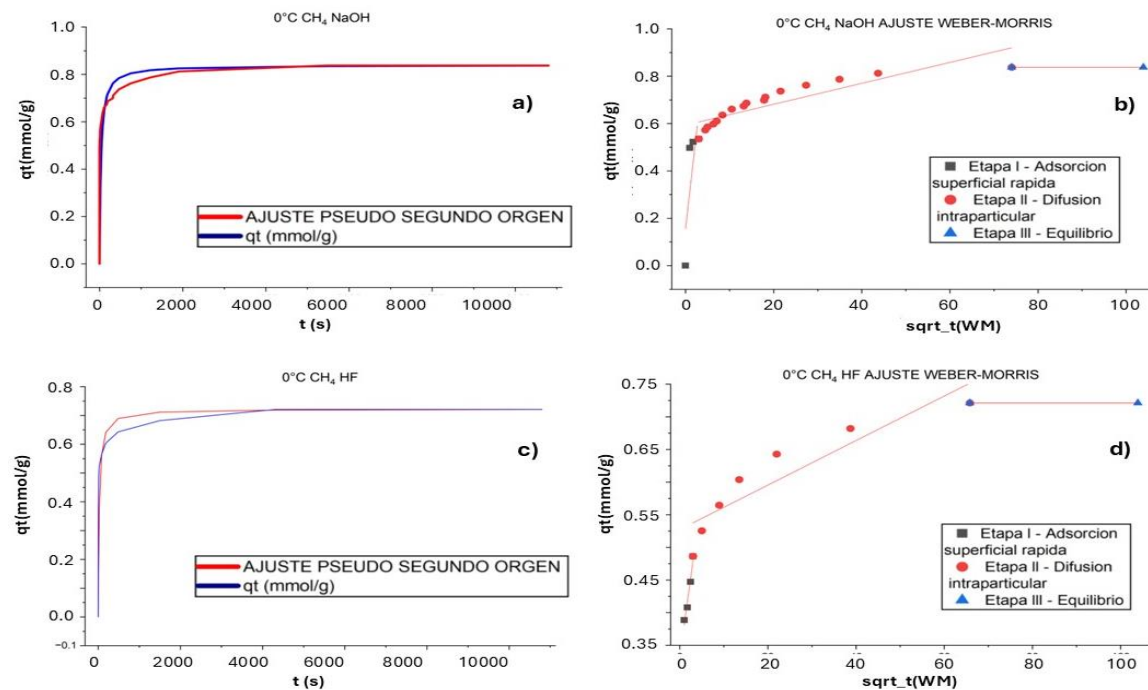


Figura 18. Ajuste de las cinéticas de CO_2 a 40°C al modelo de pseudo-segundo orden (Figura 18a para NaOH y Figura 18c para HF) y modelo de Weber-Morris (Figura 18b para NaOH y Figura 18d para HF).



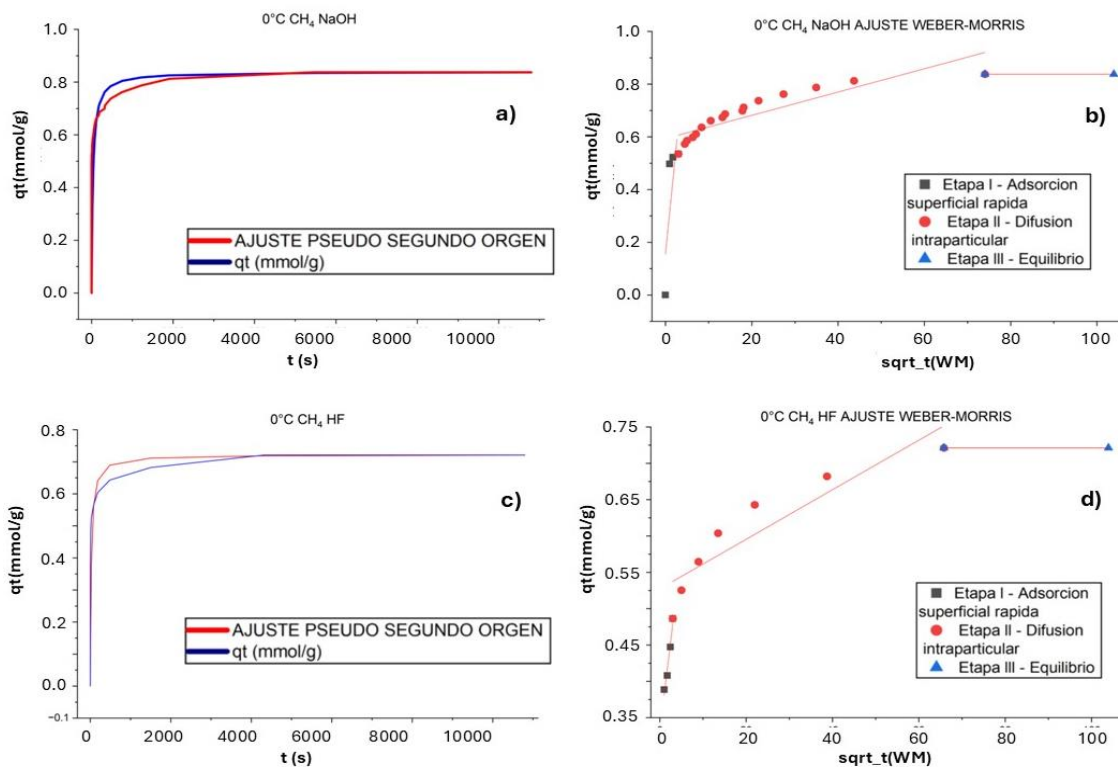


Figura 19. Ajuste de las cinéticas de CH_4 a 0°C al modelo de pseudo-segundo orden (Figura 19a para NaOH y Figura 19c para HF) y modelo de Weber-Morris (Figura 19b para NaOH y Figura 19d para HF).

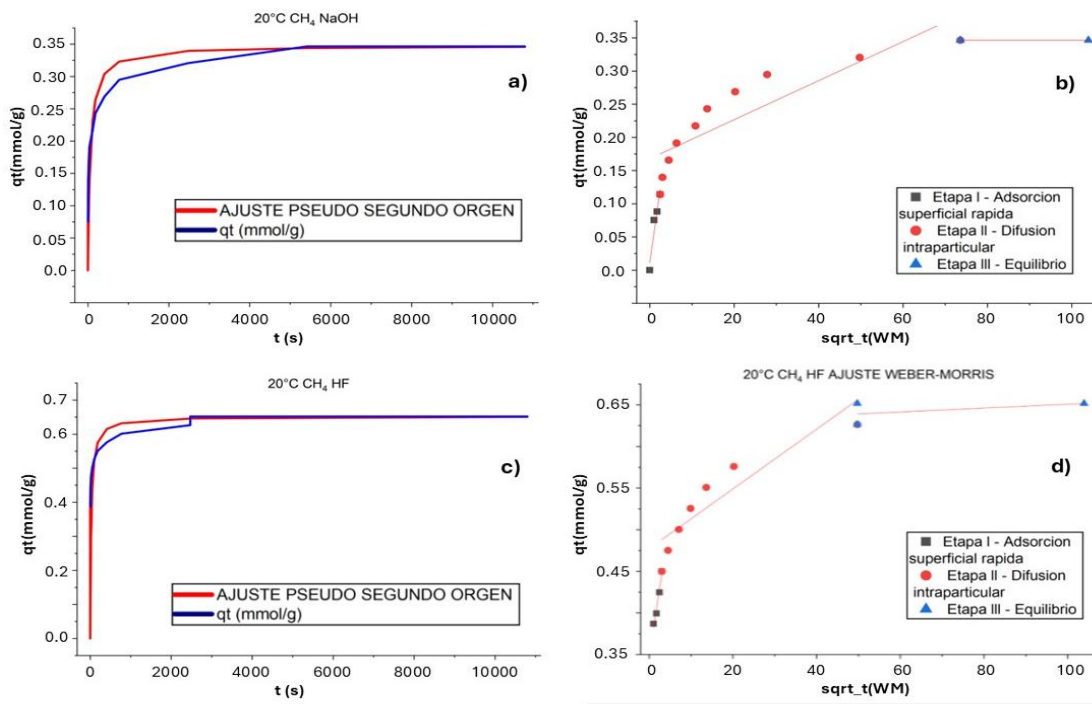


Figura 20. Ajuste de las cinéticas de CH_4 a 20°C al modelo de pseudo-segundo orden (Figura 20a para NaOH y Figura 20c para HF) y modelo de Weber-Morris (Figura 20b para NaOH y Figura 20d para HF).

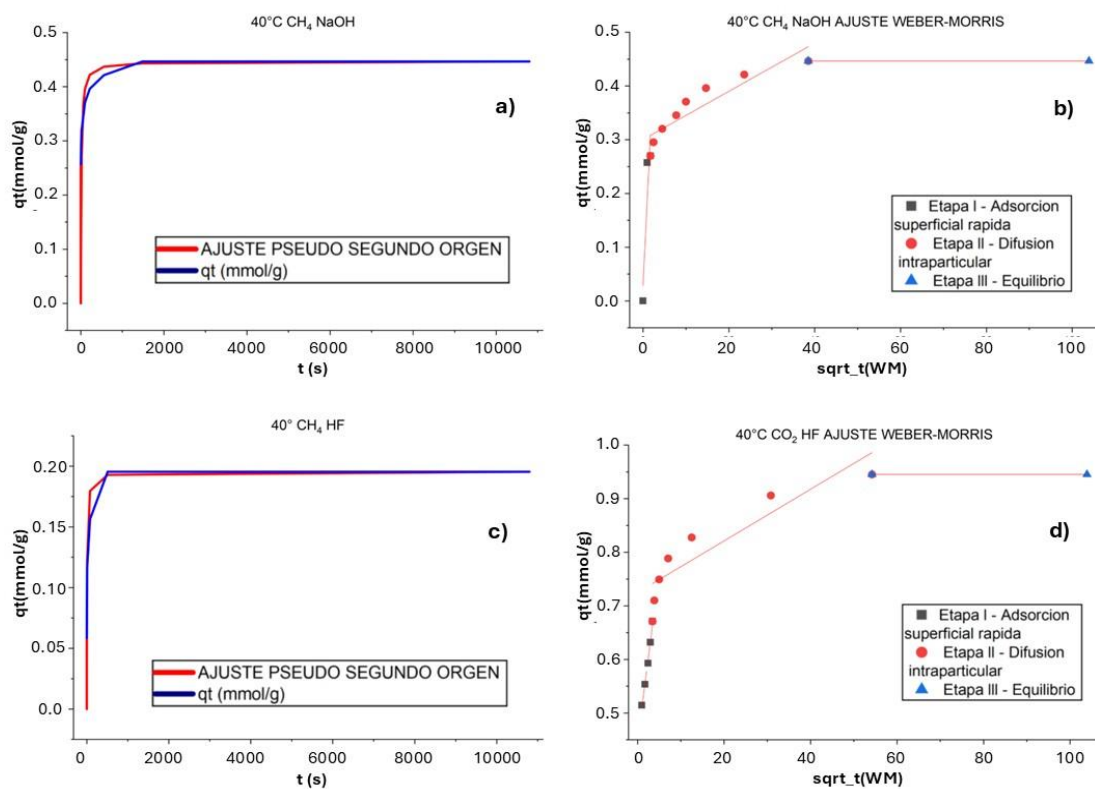


Figura 21. Ajuste de las cinéticas de CH_4 a 40°C al modelo de pseudo-segundo orden (Figura 21a para NaOH y Figura 21c para HF) y modelo de Weber-Morris (Figura 21b para NaOH y Figura 21d para HF).

Tabla 3. Parámetros de interés de ajustes a modelos cinéticos

Muestra	R^2	q_e	k_2	H	C	K_{id}	Mecanismo (wm)
CO_2 – MST 0°C	0.99870	0.9987	0.0250	0.02494	0.292	0.00170	Mixto ($C>0$)
CO_2 – HF 0°C	0.99996	1.7888	0.0306	0.09791	1.216	0.00893	Mixto ($C>0$)
CH_4 – HF 0°C	0.99992	0.7220	0.06020	0.03142	0.49089	0.00298	Mixto ($C>0$)

CO₂ -NaOH 0 °C	0.99997	2.0610	0.03400	0.14442	1.589	0.00710	Mixto (C>0)
CH₄ – NaOH 0 °C	0.99989	0.840	0.03640	0.02567	0.55054	0.00421	Mixto (C>0)
CO₂ –MST 20 °C	0.99980	0.6100	0.0114	0.00424	0.224	0.00507	Mixto (C>0)
CO₂ – HF 20 °C	0.99994	1.7070	0.0341	0.09936	1.295	0.0341	Mixto (C>0)
CO₂ -NaOH 20 °C	0.99987	1.4252	0.03177	0.06453	1.022	0.00578	Mixto (C>0)
CH₄ – HF 20°C	0.99988	0.6520	0.06209	0.02640	0.46721	0.00253	Mixto (C>0)
CH₄ – NaOH 20 °C	0.99958	0.348	0.04903	0.00592	0.1386	0.00274	Mixto (C>0)
CO₂ – HF 40°C	0.99998	0.9460	0.08746	0.07827	0.67625	0.00364	Mixto (C>0)
CH₄ – HF 40 °C	1	0.196	0.71835	0.02747	0.08943	0.00123	Mixto (C>0)
CO₂ –NaOH 40 °C	0.99998	1.201	0.07271	0.10488	0.85421	0.00510	Mixto (C>0)
CH₄ – NaOH 40 °C	0.99999	0.447	0.17448	3.54975	0.28171	0.00226	Mixto (C>0)

9. CONCLUSIONES

Como resultado de la presente investigación, se concluye que los materiales sintetizados a partir de fuentes lignocelulósicas consideradas como *residuos forestales*, específicamente las cortezas de Eucalipto, presenta un gran potencial para su aprovechamiento como adsorbente sostenible de CO₂ y CH₄. Su obtención mediante un proceso de gelificación asistido con silicato de sodio (Na₂SiO₃), seguida de una etapa de carbonización a 900 °C bajo flujo continuo de N₂, permitió obtener aerogeles carbonosos con estructura estable y homogénea.

El tratamiento posterior con medios químicos demostró ser determinante en el desarrollo textural y funcional de los materiales. En particular, el lavado con ácido fluorhídrico (HF) promovió la eliminación total de los grupos silicato, generando un material con mayor porosidad, mientras que el tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) produjo una remoción parcial, conservando parte de los grupos silicato en la red. Estas diferencias estructurales se corroboraron mediante los análisis de espectroscopía infrarroja (IR) y microscopía electrónica de barrido (SEM), con lo que se comprueba diferencias en la superficie y en la morfología asociadas al tipo de tratamiento químico aplicado. Por otra parte, el aerogel sin lavado produce un material sin porosidad, ni capacidad de adsorción.

Los estudios de adsorción revelaron que ambos materiales presentan una marcada selectividad hacia el CO₂. En particular, el material lavado con NaOH mostró la máxima capacidad de adsorción de CO₂ ($q = 1.43$ mmol/g a 20 °C), lo cual sugiere que la presencia de los grupos silicato contribuye activamente al proceso de captura. Además, se observó un incremento de la capacidad de adsorción al disminuir la temperatura ($q = 2.06$ mmol/g a 0 °C y $q = 1.20$ mmol/g a 40 °C), confirmando el carácter exotérmico del fenómeno. En contraste, las capacidades de adsorción del CH₄ fueron considerablemente menores (0.84 mmol/g a 0 °C, 0.47 mmol/g a 20 °C y 0.35 mmol/g a 40 °C), reafirmando la selectividad del material hacia el CO₂.

Desde el punto de vista cinético, los resultados obtenidos mostraron que la adsorción de ambos gases se ajusta adecuadamente al modelo de pseudo-segundo orden, lo que indica que el proceso está controlado predominantemente por interacciones químicas o fisicoquímicas entre el adsorbato y los sitios activos de la superficie del adsorbente. Asimismo, los datos experimentales se ajustaron al modelo de difusión intraparticular de Weber–Morris, el cual

evidenció tres etapas secuenciales características del proceso: una fase inicial de adsorción superficial rápida, seguida de una etapa de difusión intraparticular dentro de los poros, y finalmente una etapa de equilibrio. La identificación clara de estas tres regiones sugiere que el transporte de masa y la estructura porosa desempeñan un papel determinante en la eficiencia global del proceso de adsorción.

Finalmente, los estudios de reversibilidad demostraron que la adsorción para ambos gases es totalmente reversible, permitiendo la regeneración del material mediante la aplicación de vacío sin pérdida significativa de capacidad adsorbente. Esta propiedad, junto con su bajo costo de obtención, origen renovable y estabilidad térmica, posiciona a los aerogeles derivados de Eucalipto y Copal como candidatos prometedores para el almacenamiento, transporte y separación selectiva de CO₂ y CH₄, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías limpias orientadas a la mitigación de gases de efecto invernadero y al aprovechamiento sostenible de residuos forestales.

10.BIBLIOGRAFÍA

Adam, J. C. L. (2007). Captador solar transparente para aplicaciones solares térmicas (Patente ES2262417B1).

<https://patents.google.com/patent/ES2262417B1/es>

Adamez, R., & Baldemar, J. (2011, 1 de septiembre). Estudio de las propiedades mecánicas, térmicas y de comportamiento al fuego de aerogeles polímero/arcilla.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Estudio-de-las-propiedades-mec%C3%A1nicas%2C-t%C3%A9rmicas-y-de-Adamez-Baldemar/3a8d453f03ab4a931c7e2c62c4ac91f637452023>

Aerogels insulate missions and consumer products. (2008). En Spinoff 2008: 50 years of NASA-derived technologies (1958–2008). NASA.

<https://ntrs.nasa.gov/citations/20090002467>

Aragón-Gutiérrez, A., Arrieta, M. P., López-González, M., Fernández-García, M., & López, D. (2018). Biocompuestos híbridos en base a PLA y aerogel de sílice para aplicaciones en envases

alimentarios. *Revista de Plásticos Modernos: Ciencia y Tecnología de Polímeros*, 115(731), Artículo 731.

<https://produccioncientifica.ucm.es/documentos/63d1e0c381172637822c36c5>

Benedito Borrás, A. (2013). Aerogeles: El fantasma azul. *Revista de Plásticos Modernos: Ciencia y Tecnología de Polímeros*, (676), 85–87.

Celzard, A., Fierro, V., Amaral-Labat, G., Szczurek, A., Braghiroli, F., Parmentier, J., Pizzi, A., & Kuznetsov, B. N. (2012). Carbon gels derived from natural resources. *Carbon*, 50(3), 845–859.

Gállego, C. M. (2016, 23 de noviembre). Aerogeles de carbono y compuestos funcionales híbridos con propiedades adecuadas para electrodos en desionización capacitiva [Tesis doctoral].

<https://www.semanticscholar.org/paper/Aerogeles-de-carbono-y-compuestos-funcionales-con-G%C3%A1llego/f951d83cd77966b30393b66a1b609ce85cca8aa7>

Gutiérrez, M. P., & Castellanos, M. A. (2011). Síntesis por el método sol–gel aplicado al estudio del polimorfismo en nanopartículas de TiO₂. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 4(1), 67–73.

<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2011.1.50990>

Herrera-Fuentes, I. A., Quimis-Ponce, K. L., Sorroza-Rojas, N. A., García-Larreta, F. S., Mariscal-Santi, W., & Mariscal-García, R. E. (2017). Determinación de taninos y cumarinas presentes en la planta Tres Filos. *Polo del Conocimiento*, 2(7), 500–514.

<https://doi.org/10.23857/pc.v2i7.257>

Hüsing, N., & Schubert, U. (1998). Aerogels—Airy materials: Chemistry, structure, and properties. *Angewandte Chemie International Edition*, 37(1–2), 22–45.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3773\(19980202\)37:1/2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3773(19980202)37:1/2)

<22::AID-ANIE22>3.0.CO;2-I

Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS Omega*, 6(48), 32342–32348.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>

Kistler, S. S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies. *Nature*, 127(3211), 741.

<https://doi.org/10.1038/127741a0>

Kistler, S. S. (1932). Coherent expanded-aerogels. *The Journal of Physical Chemistry*, 36(1), 52–64.

<https://doi.org/10.1021/j150331a003>

Kuzmin, V., Safiullin, K., Stanislavovas, A., & Tagirov, M. (2017). Helium-3 gas self-diffusion in a nematically ordered aerogel at low temperatures: Enhanced role of adsorption. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(34), 23146–23153.

<https://doi.org/10.1039/C7CP03949B>

Liskiewicz, I. (2020). El aerogel en la arquitectura bioclimática [Tesis de licenciatura]. Universidad Politécnica de Madrid.

<https://oa.upm.es/58006/>

López-Suevos Fraguera, F. (2003). Preparación de adhesivos industriales empleando taninos de la corteza del pino [Tesis doctoral]. Universidade de Santiago de Compostela.

<https://investigacion.usc.gal/documentos/5d1df66729995204f766b0c4>

Martínez-Alier, J., Owen, A., Roy, B., Bene, D. D., & Rivin, D. (2018). Blockadia: Movimientos de base contra los combustibles fósiles y a favor de la justicia climática. *Anuario Internacional CIDOB*, 41–49.

Morales Torres, S. (2009). Materiales monolíticos avanzados de carbón para la eliminación de contaminantes orgánicos mediante procesos catalíticos de oxidación en fase gaseosa y líquida [Tesis doctoral]. Universidad de Granada.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=64090>

Nuevo aislante multicapa procedente de reciclado de NFU con funciones de aislamiento térmico, acústico y de absorción sonora. (s. f.).

<https://www.semanticscholar.org/paper/Nuevo-Aislante-Multicapa-Procedentes-de-Reciclado-y-Limitada-Goldberg/639f3501aada0ba023fac55a8e4e9588d4c71fe8>

Palma, D., Valdés, A., & Rodríguez, Á. (2024). Impacto del cambio climático en el desarrollo de Panamá. Cuadernos de Coyuntura, 2(2), Artículo 2.

<https://doi.org/10.48204/J.cc.n2.a5287>

Rasines, G. (2015). Efecto de las condiciones de prepolimerización en aerogeles nitrogenados y su influencia en desionización capacitiva [Tesis doctoral].

Romero, T. S. G. (2013). Pintura aislante de base agua, con micropartículas de aerogel (Patente ES2428794A1).

<https://patents.google.com/patent/ES2428794A1/es>

Ross, H., & Baldwin, C. (2018). Who will take responsibility for creating a low carbon future? Australasian Journal of Environmental Management, 25(4), 365–370.

<https://doi.org/10.1080/14486563.2018.1538150>

Sánchez, L. M. (2012). Preparación, caracterización y aplicación de aerogeles de carbono nanocompuestos con metales como catalizadores y electrocatalizadores de reacciones orgánicas [Tesis doctoral].

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:169360438>

Sánchez-Yáñez, J. M. (2014). El impacto del calentamiento global, su importancia para América Latina. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 5(1), 1–2.

Santos Ucha, J. (2013a). Formulación y caracterización de adhesivos para tableros de madera empleando taninos de la cáscara de castaña y de la corteza de eucalipto [Tesis doctoral]. Universidade de Santiago de Compostela.

<https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/9583>

Santos Ucha, J. (2013b). Formulación y caracterización de adhesivos para tableros de madera empleando taninos de la cáscara de castaña y de la corteza de eucalipto [Tesis doctoral]. Universidade de Santiago de Compostela.

<https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/9583>

Toledo-Fernández, J. A., Mendoza-Serna, R., Morales-Flórez, V., de la Rosa-Fox, N., Santos, A., Piñero, M., & Esquivias, L. (2007). Aerogeles con aplicaciones en biomedicina y medioambiente. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 46(3), 138–144.

<https://doi.org/10.3989/cyv.2007.v46.i3.246>

Estrada, F., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O., & Botzen, W. (2022). Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change*, 22(4), 126.

<https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>

Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Jr., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., ... Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(38), 9592–9597.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>

- Langmuir's theory of adsorption: A centennial review. (2019). *Langmuir*, 35(25), 7457–7470.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00154>
- Vigdorowitsch, M., Pchelintsev, A., Tsygankova, L., & Tanygina, E. (2021). Freundlich isotherm: An adsorption model complete framework. *Applied Sciences*, 11(17), 8078.
<https://doi.org/10.3390/app11178078>
- Torres-Carrasco, M., Palomo, J. G., & Puertas, F. (2014). Sodium silicate solutions from dissolution of glass wastes: Statistical analysis. *Materiales de Construcción*, 64(314), e014.
<https://doi.org/10.3989/mc.2014.05213>
- Vareda, J. P., et al. (2023). On validity, physical meaning, mechanism insights and controversies of adsorption kinetic models. *Chemical Engineering Journal*, 454, 143303.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121416>
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122156.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156> :contentReference[oaicite:4]{index=4}
- Gregg, S. J., & Sing, K. S. W. (1982). *Adsorption, surface area and porosity* (2nd ed.). Academic Press.
- Ruthven, D. M. (1984). *Principles of adsorption and adsorption processes*. John Wiley & Sons.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Physical chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Kayser H. (1881). *Wiederman's Annalen Der Physik and Chemie*, 12, 526.
- Von Giesen J. (1903). *Drud. Annalen Der Physik*, 10, 838