

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE ODONTOLOGÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**EVALUACIÓN MICRO Y NANOSCÓPICA DE AEROGEL DE  
POLIMETILMETACRILATO, ZINC Y CARBONATO DE CALCIO EN  
PRESENCIA  
DE POLISACÁRIDOS COMO RECUBRIMIENTOS ORTODÓNCICOS**

**POR: C.D. SEBASTIÁN ALEJANDRO BAEZA VERA**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN ESTOMATOLOGÍA OPCIÓN ORTODONCIA**

**CHIHUAHUA, CHIH.**

**NOVIEMBRE DE 2023**



Evaluación micro y nanoscópica de aerogeles de polimetilmetacrilato, zinc y carbonato de calcio en presencia de polisacáridos como recubrimientos ortodóncicos. Tesis presentada por C.D. Sebastián Alejandro Baeza Vera como requisito para obtener el grado de Maestro en Estomatología, ha sido aprobada y aceptada por:

---

M.E.S. Juan Antonio Galache Vega.  
Director de la Facultad de Odontología

---

C.D.E.O. Rosa Margarita Aguilar Madrigal.  
Secretaria de Investigación y Posgrado

---

Dr. Humberto Alejandro Monreal Romero.  
Director de tesis

---

Dr. Alfredo Nevárez Rascón  
Asesor de tesis

---

Noviembre del 2023

Fecha

## **AGRADECIMIENTOS**

“La gratitud es el único secreto que no puede revelarse por sí mismo”

Emily Dickinson

Con gratitud para mis padres José Baeza y Bertha Vera y Vicky (†) que siempre creyeron en mí y pusieron todo su empeño, para verme convertido en un hombre de bien y así alcanzar mis sueños de convertirme en un Ortodoncista.

A mis hermanos José Luis, Bertha Alicia, Iván Fernando, Gerardo, Cristina y Mónica, por su generosidad y cariño al igual que su apoyo para seguir adelante, de igual forma a mi pareja Asela quien siempre está apoyandome a cada paso que doy.

Mi reconocimiento y gratitud a la Facultad de Odontología y a todos sus maestros que compartieron sus conocimientos, experiencias y consejos para formar estudiantes de calidad orgullosos de llevar su alma mater y profesión a lo más alto.

A mis compañeras de maestría con quienes formamos equipo de trabajo y estudio que trascendió en una gran amistad que perdurará por años para ser colegas y compañeros de vida.

A mi director de tesis al doctor Humberto Alejandro Monreal Romero por no desistir en realizar el mejor trabajo posible y apoyarme a lo largo de las etapas de presentación de tesis y estar de mano trabajando en este proyecto que con mucho esfuerzo presento.

A CONACYT por el apoyo recibido durante mis estudios mediante la Beca Nacional para Estudios de Posgrado con número de registro No. CVU 1140124.

## RESUMEN

Evaluación micro y nanoscópica de aerogeles de polimetilmetacrilato, zinc y carbonato de calcio en presencia de polisacáridos como recubrimientos ortodónticos

Por:

C.D. Sebastián Alejandro Baeza Vera

Maestría en Estomatología

Secretaria de Investigación y Posgrado

Facultad de Odontología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Director de Tesis: Dr. Humberto Alejandro Monreal Romero

Los aerogeles son materiales que se caracterizan por sus propiedades extraordinarias como una densidad ultrabaja, ser aislantes térmicos muy eficaces y su estructura tridimensional que por consecuencia su morfología superficial sea en extremo porosa, dando lugar a una amplia gama de aplicaciones de este material. El objetivo de este estudio es evaluar las características estructurales de aerogeles de PMMA, Zn y  $\text{CaCO}_2$  a niveles micro y nanoscópico, sintetizados en una red 3D de polisacáridos para aplicaciones ortodónticas. Se realizó la caracterización de dos muestras de aerogel de PMMA, Zn y  $\text{CaCO}_2$  con cámara profesional, microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido, se determinaron las características morfológicas superficiales, así como también sus características micro y nanoscópicas, se comparó la distancia entre valles y

crestas de su red tridimensional compuesta de polisacáridos. Los resultados encontrados en la morfología determinaron que tienen una forma semi circular de bordes irregulares con un tamaño de 2mm de diámetro y de superficie porosa con color café claro y consistencia dura, a la magnificación con microscopio se determinó que su estructura es similar a la de un mineral con las mismas características descritas en su superficie morfológica, a una magnificación nanoscópica, se determinaron las distancias de valles y crestas de sus partículas siendo muy variables las distancias permitiendo que su estructura tridimensional sea muy porosa y altamente aislante. Conclusiones, se sugieren múltiples aplicaciones para ser usados en áreas como ortodoncia, periodoncia y prostodoncia, con una ruta de bajo costo de sintetización de materiales en odontología.

## **ABSTRACT**

### **MICRO – AND NANOSCOPIC EVALUATION OF POLYMETHYLMETHACRYLATE, ZINC, AND CALCIUM CARBONATE AEROGELS IN THE PRESENCE OF POLYSACCHARIDES AS ORTHODONTIC COATINGS.**

By:

C.D. SEBASTIAN ALEJANDRO BAEZA VERA.

Aerogels are materials that are characterized by their extraordinary properties such as ultra-low density, being very effective thermal insulators, and their three-dimensional structure that as a consequence their surface morphology is extremely porous, giving rise to a wide range of applications of this material. This study aims to evaluate the structural characteristics of PMMA, Zn, and CaCO<sub>2</sub> aerogels at micro and nanoscopic levels, synthesized in a 3D polysaccharide network for orthodontic applications. The characterization of two samples of PMMA, Zn, and CaCO<sub>2</sub> aerogel was carried out with a professional camera, optical microscope, and scanning electron microscope, the surface morphological characteristics were determined, as well as its micro and nanoscopic characteristics, the distance between valleys and ridges of its three-dimensional network composed of polysaccharides was compared. The results found in the morphology determined that they have a semi-circular shape with irregular edges with a size of 2mm in diameter and a porous surface with a light brown color and hard consistency, at microscopic magnification it was determined that its structure is similar to that of a mineral with the same characteristics described in its morphological surface, at nanoscopic magnification, the distances of valleys and ridges of its particles were determined being very variable distances allowing its three-dimensional structure to be very porous and highly insulating. Conclusions, multiple applications are suggested to be used in areas such as orthodontics, periodontics, and prosthodontics, with a low-cost route of synthesizing materials in dentistry.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VII
CONTENIDO .....	VIII
LISTA DE CUADROS.....	X
LISTA DE TABLAS .....	XII
LISTA DE ABREVIACIONES .....	XIII
MARCO TEÓRICO .....	1
Introducción.....	1
<i>Características de biomateriales.</i> .....	3
<i>Obtención de Aerogeles.</i> .....	5
<i>Aplicaciones.</i> .....	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
JUSTIFICACIÓN.....	17
HIPOTÉISIS .....	18
OBJETIVO GENERAL.....	19
Objetivos Específicos.....	19
METODOLOGÍA .....	20
Tipo de estudio:.....	20



Diseño de estudio: .....	20
Población de estudio o muestra: .....	20
Lugar de realización:.....	22
Operación de las variables: .....	22
Materiales y métodos:.....	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
CONCLUSIONES .....	49
REFERENCIAS .....	50

## LISTA DE CUADROS

Figura 1 Diagrama del proceso de secado supercrítico. (Hecho en biorender) ...	8
Figura 2 Muestras de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de Calcio (fotografía tomada por el autor) .....	21
Figura 3 Microscopio óptico Zeiss K7 (fotografía tomada por el autor) .....	23
Figura 4 Microscopio Electrónico de barrido (fotografía tomada por el autor) ...	24
Figura 5 Microscopio Estereoscópico (fotografía tomada por el autor) .....	25
Figura 6 Logotipo Excel® (Descargada de página oficial) .....	26
Figura 7 Cámara Canon Rebel T6 (tomada de internet) .....	27
Figura 8 Lente Macro de 100mm Canon (tomada de internet) .....	28
Figura 9 Pantalla led (Fotografía tomada por el autor) .....	29
Figura 10 Cpu Active Cool 500w .....	30
Figura 11 Papel Milimétrico .....	31
Figura 12 Muestra de PMMA, Zn, y CaCO <sup>3</sup> (fotografía tomada por el autor) ....	35
Figura 13 segunda muestra de PMMA, Zn y CaCO <sup>3</sup> (fotografía tomada por el autor) .....	36

Figura 14 Aerogel de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de Calcio. (PMMA) a una magnificación de 8x en un Microscopio Estereoscópico Leica EZ4HD, visto a través de una pantalla de TV. ....	39
Figura 15 Aerogel de PMMA visto en una magnificación de 20x a través de un Microscopio Estereoscópico Leica EZ4HD, por medio de una pantalla de TV. .	40
Figura 16 Aerogel de PMMA visto en una magnificación de 35x. ....	41
Figura 17 Captura de pantalla de muestra 1 de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, visto a una magnificación de 35,000x por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM).....	43
Figura 18 Captura de pantalla de muestra 2 de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, visto a una magnificación de 35,000x por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM).....	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Histograma de frecuencias del tamaño de las partículas tomando de referencia 20nm de la muestra 1. ....	44
Tabla 2 Histograma de frecuencias del tamaño de las partículas tomando de referencia 20nm de la muestra 2. ....	46
Tabla 3 Comparativa de características de microscópicas y características nanoscópicas de ambas muestras de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de Calcio. ....	48

## LISTA DE ABREVIACIONES

<b>Concepto</b>	<b>Termino</b>
3D	Tres dimensiones
CO <sup>2</sup>	Dióxido de carbono
RF	Resorcinol-Formaldehído
2D	Dos dimensiones
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
GNL	Gas Natural Licuado
PMMA	Polimetilmetacrilato
Zn	Zinc
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio
MEB	Microscopio Electrónico de barrido
CIMAV	Centro de investigación en materiales avanzados
TV	Televisión
SEM	Scanning Electron Microscopy

## **MARCO TÉORICO**

### **Introducción**

En el escenario de la constante evolución de la ciencia de los materiales, los aerogeles son un testimonio del ingenio humano, superando los límites de lo que es posible en el panorama de la ingeniería de materiales. Los aerogeles, a veces denominados "humo congelado" o "aire sólido", representan una clase notable de materiales caracterizados por sus asombrosas propiedades, como densidad ultra baja, aislamiento térmico excepcional y aplicaciones versátiles en múltiples industrias. Esta tesis explora el extraordinario mundo de los aerogeles, profundizando en sus propiedades únicas y hasta técnicas de fabricación innovadoras y una amplia gama de aplicaciones. (1, 2)

Los aerogeles, sintetizados por primera vez a principios de la década de 1930 por el Dr. Samuel S. Kistler, han sido testigos de un resurgimiento del interés y la investigación en los últimos años. Esta reanudación de investigación se debe a sus atributos extraordinarios, que los hacen invaluable en campos que van desde el aeroespacial, la construcción y hasta el almacenamiento de energía y la restauración ambiental. En medida que la comunidad mundial enfrenta desafíos apremiantes como la eficiencia energética, la sostenibilidad ambiental y el avance tecnológico, los aerogeles han surgido como una solución prometedora para abordar estos problemas. (3)

Este trabajo comienza con una exploración de los principios fundamentales que subyacen a los aerogeles. Se profundizará en la nanoestructura única de los aerogeles, caracterizada por su intrincada red de poros interconectados, lo que contribuye a sus notables propiedades. (4)

Comprender las relaciones estructura-propiedad de los aerogeles es crucial para adaptar su rendimiento a aplicaciones específicas.

Se analizarán los diversos métodos empleados en la fabricación de aerogeles. Desde el proceso tradicional sol-gel hasta innovaciones más recientes como la impresión 3D y la deposición química de vapor, estos métodos ofrecen un control preciso sobre las propiedades del aerogel y abren nuevas vías de personalización. (2, 5)

Desde la industria aeroespacial y de aislamiento hasta dispositivos biomédicos y remediación ambiental, los aerogeles han demostrado su valía en diversas industrias. Cada aplicación muestra la versatilidad y el potencial transformador de los aerogeles para abordar algunos de los desafíos más apremiantes de la sociedad. (6-8).

## **Características de biomateriales.**

Los aerogeles son materiales sintéticos que tienen una estructura similar a un gel, pero con una parte importante de su líquido reemplazado por gas, generalmente aire. Esto da como resultado un material extremadamente ligero y con notables propiedades de aislamiento térmico. (2, 4, 9-11)

Los aerogeles se crean mediante un proceso llamado sol-gel, donde se forma un gel a partir de un precursor líquido (generalmente una solución a base de sílice) y luego se somete a un secado supercrítico, que elimina el líquido mientras se preserva la estructura sólida con una red de partículas de tamaño nanométrico y poroso. El resultado es un material que es mayormente espacio vacío, con una densidad muy baja, a menudo menos de una décima parte de la del vidrio o plástico normal. (10, 12-19)

Los aerogeles tienen varias propiedades notables, que incluyen:

1. Baja densidad: Como se mencionó anteriormente, los aerogeles son increíblemente livianos, lo que los hace ideales para aplicaciones donde el peso es una preocupación. (16, 20-23)



2. Excelente aislamiento térmico: Los aerogeles tienen una conductividad térmica muy baja, lo que significa que son excelentes aislantes. Se utilizan en aplicaciones donde se requiere un aislamiento térmico eficaz, como en naves espaciales, aislamiento de edificios y ropa protectora. (24-26)

3. Transparencia: Algunos aerogeles son transparentes, lo que permite que la luz los atraviese. Esta propiedad ha llevado a su uso en componentes ópticos y para aplicaciones como la mejora de la eficiencia energética de las ventanas. (27, 28)

4. Gran superficie: Debido a su estructura porosa, los aerogeles tienen una superficie excepcionalmente alta, lo que los hace útiles en aplicaciones como catalizadores y como adsorbentes de contaminantes o gases. (29)

5. Frágil: Los aerogeles son frágiles y pueden dañarse fácilmente, por lo que a menudo se refuerzan o encapsulan cuando se usan en aplicaciones prácticas.(30-32)

Los aerogeles tienen una amplia gama de aplicaciones potenciales en campos como el aeroespacial, la construcción, el petróleo y el gas y la ciencia de materiales. (33)

## **Obtención de Aerogeles.**

Los aerogeles se pueden producir mediante varios métodos, principalmente según el tipo de material utilizado y la aplicación deseada. A continuación, se muestran algunas formas comunes de producir aerogeles:

### **1. Método Sol-Gel:**

Gelación química: Este es el método más común para producir aerogeles de sílice. Consiste en mezclar una solución precursora (normalmente alcóxidos de silicio) con un disolvente, creando un gel mediante una reacción química. Luego, el gel se somete a intercambio de disolvente y secado supercrítico para eliminar el líquido y formar el Aerogel. (2, 34-37)

### **2. Secado supercrítico:**

El secado supercrítico es un paso crítico en muchos métodos de producción de aerogel. Implica reemplazar el líquido del gel con un fluido supercrítico (como CO<sub>2</sub> supercrítico) para evitar el colapso de la estructura porosa durante el secado. (38-40)

### **3. Aerogeles de carbono:**

Gel de resorcinol-formaldehído (RF): Los aerogeles de carbono a menudo se producen a partir de geles de resorcinol-formaldehído. Estos geles se pueden pirolizar a altas temperaturas para crear aerogeles de carbono. (41, 42)

#### 4. Aerogeles poliméricos:

Aerogeles de poliuretano: Se obtienen haciendo reaccionar poliisocianatos con polioles y un agente espumante. La espuma resultante se puede secar supercríticamente para formar un aerogel polimérico.(43)

Aerogeles de poliimida: Se forman a partir de soluciones precursoras de poliimida y se pueden secar supercríticamente para crear aerogeles con excelentes propiedades térmicas y mecánicas.

#### 5. Aerogeles de óxido metálico:

Los aerogeles de óxidos metálicos, como los aerogeles de dióxido de titanio o de óxido de hierro, se pueden sintetizar mediante el proceso sol-gel con precursores metálicos y posterior secado supercrítico. (44-46)

#### 6. Aerogeles de biopolímero:

Los aerogeles de biopolímeros, como los aerogeles de quitosano o de celulosa, están elaborados a partir de biopolímeros extraídos de fuentes naturales. A menudo se producen mediante un proceso sol-gel similar con precursores de biopolímeros. (47, 48)

#### 7. Aerogeles de materiales 2D:

Aerogeles de grafeno: Se producen creando una suspensión de óxido de grafeno y luego reduciéndola a grafeno en forma de gel, seguido de un secado supercrítico. (49, 50)

#### 8. Impresión 3D:

Se han adaptado técnicas de impresión 3D para crear aerogeles con formas complejas. Las tintas precursoras que contienen materiales formadores de aerogel se depositan capa por capa y posteriormente se secan supercríticamente. (51-53)

#### 9. Electrogiro:

El electro spinning se utiliza para producir aerogeles de nano fibras. Las soluciones poliméricas se hilan electrostáticamente en nano fibras, que luego se consolidan en aerogeles. (51)

La elección del método de producción depende del material de aerogel deseado, de sus propiedades y de la aplicación específica. Cada método tiene sus ventajas y limitaciones.

El secado supercrítico es un paso crucial en la producción de aerogeles, ya que ayuda a preservar la estructura porosa del gel mientras elimina el componente líquido. A continuación, se ofrece una descripción general del proceso de secado supercrítico para producir aerogeles (Fig. 1):

# Supercritical Drying

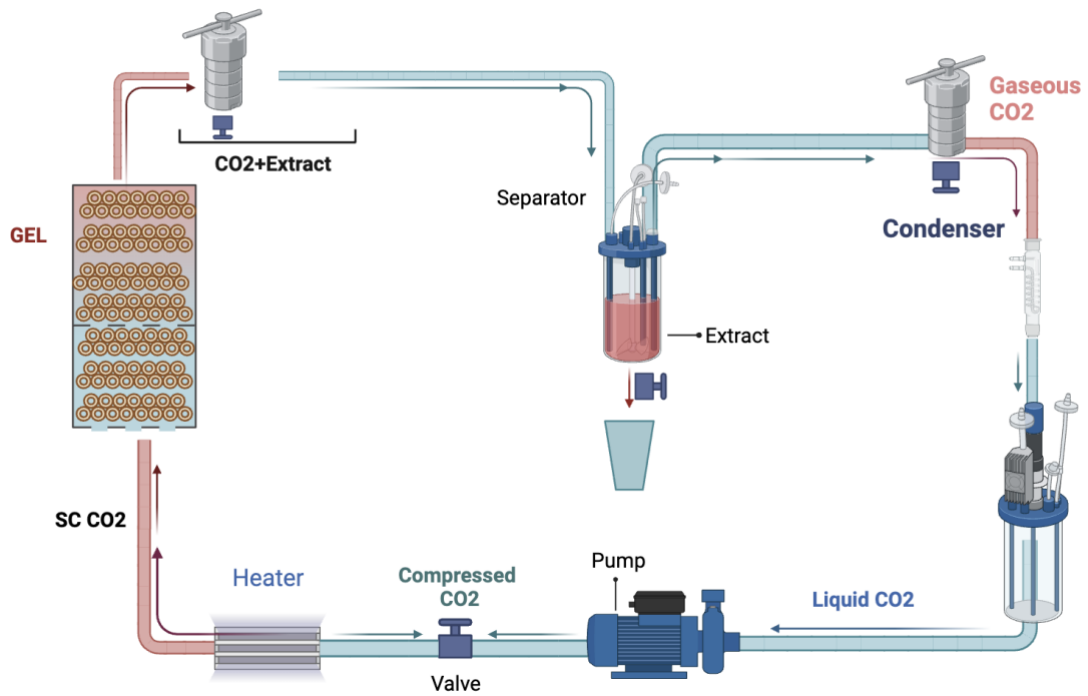


Figura 1 Diagrama del proceso de secado supercrítico.

Diagrama realizado por el Autor en Biorender®

### 1. Formación del Gel:

El primer paso para crear un aerogel es la formación de un gel. Esto normalmente se logra mediante el proceso sol-gel, donde un precursor líquido se mezcla con un solvente para formar un gel. El gel contiene una red de partículas sólidas o polímeros suspendidos en un líquido.

### 2. Inmersión en un fluido supercrítico:

Una vez formado el gel, se sumerge cuidadosamente en un fluido supercrítico, a menudo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), pero a veces otros gases como etano o propano. Los fluidos supercríticos son sustancias que se calientan y presurizan más allá de sus puntos críticos, donde exhiben propiedades similares a las de los gases y líquidos.

### 3. Temperatura y presión coincidentes:

El fluido supercrítico se elige en función de su capacidad para penetrar el gel y sustituir la fase líquida sin provocar un colapso estructural. La temperatura y la presión se ajustan para llevar el fluido supercrítico a un estado en el que tenga la densidad y el poder de solvatación necesarios para el proceso.

### 4. Reemplazo de solvente:

A medida que el fluido supercrítico se infiltra en el gel, reemplaza gradualmente el disolvente original en el gel. Este proceso debe controlarse

cuidadosamente para evitar cambios bruscos de presión que podrían dañar la delicada estructura del gel.

#### 5. Extracción Supercrítica:

Se deja que el fluido supercrítico se difunda a través del gel, arrastrando el disolvente. Este paso es crucial porque evita que las fuerzas capilares provoquen el colapso de la estructura porosa del gel durante el secado.

#### 6. Reducción de presión:

Una vez que se elimina el disolvente, la presión se reduce gradualmente, permitiendo que el fluido supercrítico vuelva a la fase gaseosa. Esto se hace lentamente para evitar la rápida expulsión del gas, que también podría causar daños estructurales.

#### 7. Formación de aerogel:

A medida que se elimina el fluido supercrítico, el componente sólido del gel queda atrás, formando un aerogel. El proceso de secado supercrítico da como resultado un material con una estructura abierta y muy porosa llena de aire o gas, creando las propiedades características de un aerogel.

El secado supercrítico es un proceso delicado y preciso que requiere un control cuidadoso de la temperatura, la presión y el tiempo para evitar dañar la estructura del gel. El aerogel resultante conserva los poros a escala nanométrica

y la gran superficie que le confieren sus propiedades únicas, como baja densidad y aislamiento térmico excepcional. Este método es un paso crítico en la producción de varios tipos de aerogeles, incluidos aerogeles de sílice, aerogeles poliméricos y aerogeles de carbono. (54-63)

### **Aplicaciones.**

Los aerogeles, con sus propiedades excepcionales, encuentran una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias. Algunas de las aplicaciones notables de los aerogeles incluyen:

#### 1. Aislamiento térmico:

Los aerogeles son aislantes térmicos muy eficaces debido a su baja conductividad térmica. Se utilizan en la construcción para aislar edificios, reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia energética.(41, 64-67)

#### 2. Limpieza de derrames de petróleo:

Los aerogeles pueden absorber grandes cantidades de petróleo y al mismo tiempo repeler el agua, lo que los hace valiosos para la limpieza de derrames de petróleo. Pueden eliminar selectivamente el aceite de las superficies del agua.(20, 68-70)

#### 3. Aeroespacial:



En las naves espaciales y la exploración espacial, los aerogeles se utilizan para capturar polvo cósmico y recoger partículas de los cometas. Su baja densidad resulta ventajosa para reducir el peso total de las naves espaciales. (69, 71-73)

#### 4. Aislamiento transparente:

Algunos aerogeles de sílice son transparentes y tienen aplicaciones en ventanas y tragaluces para proporcionar aislamiento y dejar pasar la luz visible. (66, 74-77)

#### 5. Criogenia:

Los aerogeles se utilizan en aplicaciones criogénicas debido a su baja conductividad térmica. Ayudan a aislar equipos y contenedores de almacenamiento de gases y líquidos criogénicos. (78, 79)

#### 6. Ropa protectora:

Se pueden integrar aerogeles ligeros y altamente aislantes en ropa protectora para entornos extremos, como trajes espaciales y equipos de extinción de incendios. (80)

#### 7. Almacenamiento de energía:

Los aerogeles se pueden utilizar como materiales de electrodos en supercondensadores y baterías, ofreciendo una gran superficie para el almacenamiento de energía y capacidades de carga y descarga rápidas.(81)

#### 8. Aplicaciones biomédicas:

Los aerogeles se utilizan en sistemas de administración de fármacos, ingeniería de tejidos y apósitos para heridas debido a su biocompatibilidad y porosidad.(77, 82, 83)

#### 9. Remediación Ambiental:

Los aerogeles pueden adsorber y capturar contaminantes, metales pesados y compuestos orgánicos volátiles en el agua y el aire, lo que ayuda en los esfuerzos de limpieza ambiental. (84)

#### 10. Catálisis:

Los aerogeles sirven como soportes de catalizadores en reacciones químicas, mejorando la actividad catalítica debido a su alta superficie y porosidad.(85)

#### 11. Recolección de polvo espacial:

Los aerogeles se han utilizado en misiones espaciales, como la misión Stardust de la NASA, para capturar muestras de polvo cósmico y partículas de las colas de los cometas. (86, 87)

#### 12. Industria del petróleo y el gas:

En el sector del petróleo y el gas, los aerogeles se utilizan para el aislamiento de tuberías, equipos submarinos y almacenamiento de gas natural licuado (GNL). (35)

#### 13. Electrónica:

Los aerogeles se pueden utilizar en electrónica para envases ligeros y térmicamente aislantes y como materiales dieléctricos en microelectrónica. (88)

#### 14. Sensores:

Los aerogeles se pueden emplear en sensores para diversas aplicaciones, incluida la detección de humedad y detección de gases. (89)

#### 15. Dispositivos fotónicos:

Los aerogeles tienen aplicaciones en dispositivos ópticos, como interruptores ópticos y guías de ondas, debido a su transparencia óptica y su índice de refracción controlable. (89, 90)

Estas aplicaciones demuestran la versatilidad y las propiedades únicas de los aerogeles, lo que los convierte en materiales valiosos en una amplia gama de industrias y tecnologías, desde eficiencia energética y protección ambiental hasta exploración espacial y ciencia de materiales avanzada.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La evaluación a nivel micro y nanoscópica de los aerogeles es una forma de caracterizar los materiales no sólo para evaluar sus características morfológicas sino también su funcionalidad, de esta manera se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible realizar evaluar a nivel micro y nanoscópica aerogeles de polimetilmetacrilato, zinc y carbonato de calcio en presencia de polisacáridos como recubrimientos ortodóncicos?

## **JUSTIFICACIÓN**

Las similitudes que poseen los aerogeles en algunos materiales ortodónticos es notable lo que hacen de estos biomateriales un perfecto candidato para sustituir o auxiliar a los materiales actuales haciendo la practica ortodóncica, innovadora y menos costosa de lo que es actualmente, ampliando no solo a la rama de ortodoncia si no a cualquier variante de la odontología general, por estos motivos en éste trabajo de investigación se realizara la caracterización a nivel micro y nanoscópico de aerogeles de polimetilmetacrilato, zinc y carbonato de calcio en presencia de polisacáridos como recubrimientos ortodónticos para sentar las bases funcionales de su aplicación.

## **HIPOTÉISIS**

Se pretende demostrar que la estructura tridimensional de los aerogeles de PMMA, Zn y CaCO<sub>3</sub>, analizada a nivel micro y nanoscópico es apropiada como material para recubrimiento ortodóntico, debido a sus propiedades físicas, químicas y de biocompatibilidad.

Hipótesis Nula:

La estructura tridimensional de los aerogeles de PMMA, Zn y CaCO<sub>3</sub> analizada a nivel micro y nanoscópico no son materiales apropiados para recubrimiento ortodóntico, debido a sus propiedades físicas, químicas y de biocompatibilidad.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las características estructurales de aerogeles de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, sintetizados mediante una red tridimensional de polisacáridos para aplicaciones como recubrimiento ortodóntico a nivel micro y nanoscópico.

### **Objetivos Específicos**

Evaluación de la estructura del aerogel de propiedades físicas de forma microscópica y nanoscópica

Evaluación de la estructura tridimensional con imágenes de MEB



## **METODOLOGÍA**

El procedimiento se llevó a cabo en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México., en la Universidad Autónoma de Chihuahua., en las instalaciones de la facultad de odontología en un periodo de Marzo del 2021 a Junio del 2023, se realizó este diseño experimental, donde una muestra de 2 aerogeles de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, previamente sintetizados fueron caracterizados por medio de un Microscopio Óptico, Microscopio Estereoscópico y finalmente a un Microscopio electrónico de barrido donde se hizo la recolección de datos y posteriormente la interpretación y caracterización de los resultados.

### **Tipo de estudio:**

Experimental.

### **Diseño de estudio:**

Diseño de investigación experimental descriptivo transversal, de un solo tiempo.

### **Población de estudio o muestra:**

Dos muestras de aerogeles de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, previamente sintetizados. dispuestos por alumnos por el departamento de Posgrado e Investigación de la Universidad Autónoma de Chihuahua, que fueron producidas por ex alumno de la Facultad de odontología de la misma universidad, con un tamaño de 2mm de circunferencia. (Fig. 2)



*Figura 2 Muestras de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de Calcio.*

Fotografía tomada por el Autor.

**Lugar de realización:**

Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Odontología, Chihuahua, Chihuahua, México.

**Operación de las variables:**

Aerogeles de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio.

**Materiales y métodos:**

Dos muestras de aerogeles de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, de 2mm de circunferencia adquiridas por el departamento de Investigación de la Facultad de odontología de la Universidad Autónoma de Chihuahua, el uso de un microscopio óptico Zeiss K7 (Fig. 3), un microscopio electrónico de barrido JEOL 6010 Plus CIMAV (Fig. 4), un microscopio estereoscópico Leica EZ4HD (Fig. 5), el uso del programa de computadora Microsoft Excel para la captura de datos obtenidos (Fig. 6), una cámara profesional CANON Rebel T6 (Fig. 7), su aditamento de un lente macro de 100mm de la marca CANON (Fig. 8), así como el uso de una pantalla Led LG de 32" (Fig. 9) y una computadora Active Cool de 500w (Fig. 10), una vez recibidos las muestras por parte de la secretaria de investigación y posgrado, se abrieron de los empaques en los que se encontraban y se colocaron sobre un papel milimétrico. (Fig. 11).



*Figura 3 Microscopio óptico Zeiss K7*

Fotografía tomada por el Autor.



Figura 4 Microscopio Electrónico de barrido

Fotografía tomada por el Autor.



*Figura 5 Microscopio Estereoscópico*

Fotografía tomada por el Autor.



*Figura 6 Logotipo Excel®*



*Figura 7 Cámara Canon Rebel T6®*

Fotografía obtenida de Manual de operación Cámara Canon Rebel T6®





*Figura 8 Lente Macro de 100mm Canon*

Fotografía obtenida de Manual de operación Lente Macro Canon®



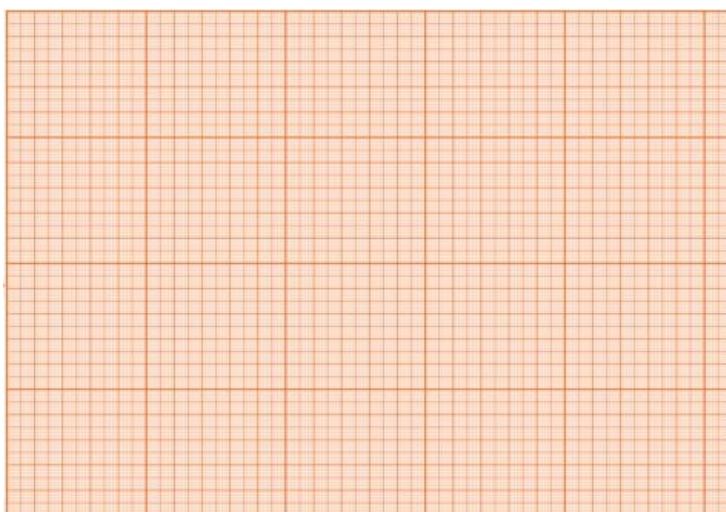
*Figura 9 Pantalla led*

Fotografía tomada por el Autor.



*Figura 10 Cpu Active Cool 500w*

Fotografía tomada por el Autor.



*Figura 11 Papel Milimétrico.*

Fotografía tomada por el Autor.

1.-Se describieron las características superficiales, en los que incluyeron tamaño, forma, diámetro y color.

2.- Se colocaron en un portaobjetos para poder ser vistos a través del microscopio óptico, y se tomaron fotografías con la cámara digital rebel T6 a una magnificación de 1:1, se capturaron los datos de las características morfológicas.

3.- Las muestras fueron puestas en el microscopio estereoscópico con pinzas para evitar la contaminación cruzada, donde se conectó a un equipo de cómputo HP y una pantalla Led de 32", y se vieron las imágenes a una magnificación de 8x donde se tomó una captura de pantalla como evidencia y uso de captura de datos. Posteriormente se incrementó la magnificación del microscopio estereoscópico a 20x se realizó la captura de pantalla y la captura de datos.

Nuevamente se incrementó a la máxima magnificación del microscopio estereoscópico a 35x, en esta parte se midieron distancias de las características morfológicas de las muestras para posteriormente tomar la captura de pantalla y captura de datos, se retiraron las muestras del portaobjetos con las pinzas, se colocó la muestra en su empaque donde fue empaquetado para ser transportado a las instalaciones de CIMAV.

#### 4.- procedimiento del electrónico de barrido

Se colocaron las muestras en un porta muestras cilíndrico de 1 cm de diámetro, en una cámara de vacío y se observó la muestra a diferentes magnificaciones.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El objeto por evaluar es una muestra del aerogel de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de Calcio.

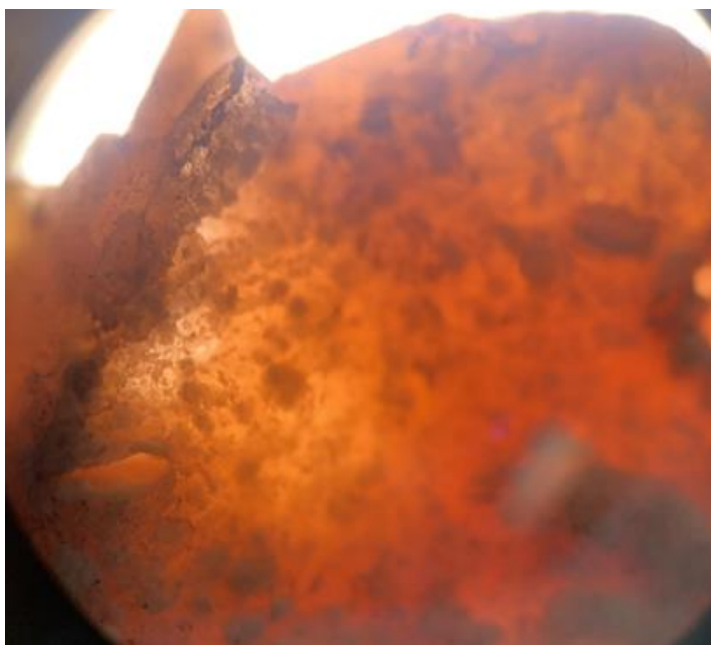
Los resultados encontrados en las descripciones morfológicas de las muestras muestran que el aerogel tiene una forma semi circular de bordes, con un tamaño de 2mm de diámetro de bordes irregulares con una superficie porosa, con un color café claro y de consistencia dura. (Fig. 12 y 13).



*Figura 12 Muestra de PMMA, Zn, y CaCO<sup>3</sup>*

Fotografía tomada por el Autor.





*Figura 13 segunda muestra de PMMA, Zn y CaCO<sup>3</sup>*

Fotografía tomada por el Autor.

En una vista con el microscopio óptico una muestra es de color blanco con estructura similar a un cristal o un mineral, con bordes mal definidos e irregulares, con una superficie rugosa, con múltiples crestas y valles que se presentan en una variación amplia de distancias entre una y otra sin un patrón aparente, en la segunda muestra no coincide el color siendo la segunda muestra de un color marrón oscuro, con bordes bien limitados pero irregulares de superficie rugosa y porosa, presentando de manera consistente a la descripción de la muestra anterior amplia cantidad de crestas y valles con variación impredecible en la distancia entre los mismos.

Las características de superficie a una magnificación de 8x en un Microscopio Estereoscópico Leica EZ4HD, donde se pueden observar el material completo, con bordes regulares y bien limitados, con una forma ovoide, en la parte interna se puede observar fisuras de un color más brillante predominando el color amarillo opaco, y zonas lisas entre las fisuras asemejando a un marmoleo.

Características de superficie a una magnificación de 20x, a esta amplificación del material se puede observar más claramente la superficie, siendo la porosidad la prevalente en la superficie, teniendo también crestas y valles que forman este tipo de superficie, las crestas tienen un color más brillante mientras que las crestas se encuentran más opacas, predomina un color café- amarillo

opaco, se observan puntilleos de color negro en varias zonas de la superficie sin ningún patrón o secuencia. Los bordes se encuentran bien delimitados.

Características de superficie a una magnificación de 35x, con esta amplificación de la muestra podemos observar de manera más detallada y clara de los valles y crestas que conforman la superficie, donde podemos medir las distancias de los valles y crestas, donde de igual forma se puede observar el predominante brillo de las crestas en comparativa con los valles, y el color característico que se describió desde un inicio sigue siendo prevalente, es más evidente el puntilleo de color negro que se encuentra en toda la superficie.

Las medidas de algunas de las zonas están descritas en la imagen en un orden descendente se midieron

Cresta de color café- amarillo brillante de una longitud de 0.0541mm

Cresta de color café- amarillo brillante con una longitud de 0.0739mm

Valle de color café- amarillo opaco con una longitud de 0.0203mm

Valle de color café- amarillo opaco con una longitud de 0.0147mm

Cresta de color café- amarillo brillante con una longitud de 0.0752mm



Figura 14 Aerogel de Polimetilmetacrilato, Zinc Y Carbonato de Calcio. (PMMA) a una magnificación de 8x en una Microscopio Estereoscópico Leica EX4HD, visto a través de una pantalla de TV.

Fotografía tomada por el Autor.



Figura 15 Aerogel de PMMA visto en una magnificación de 20x a través de un Microscopio Estereoscópico Leica EZ4HD, por medio de una pantalla de TV.

Fotografía tomada por el Autor.

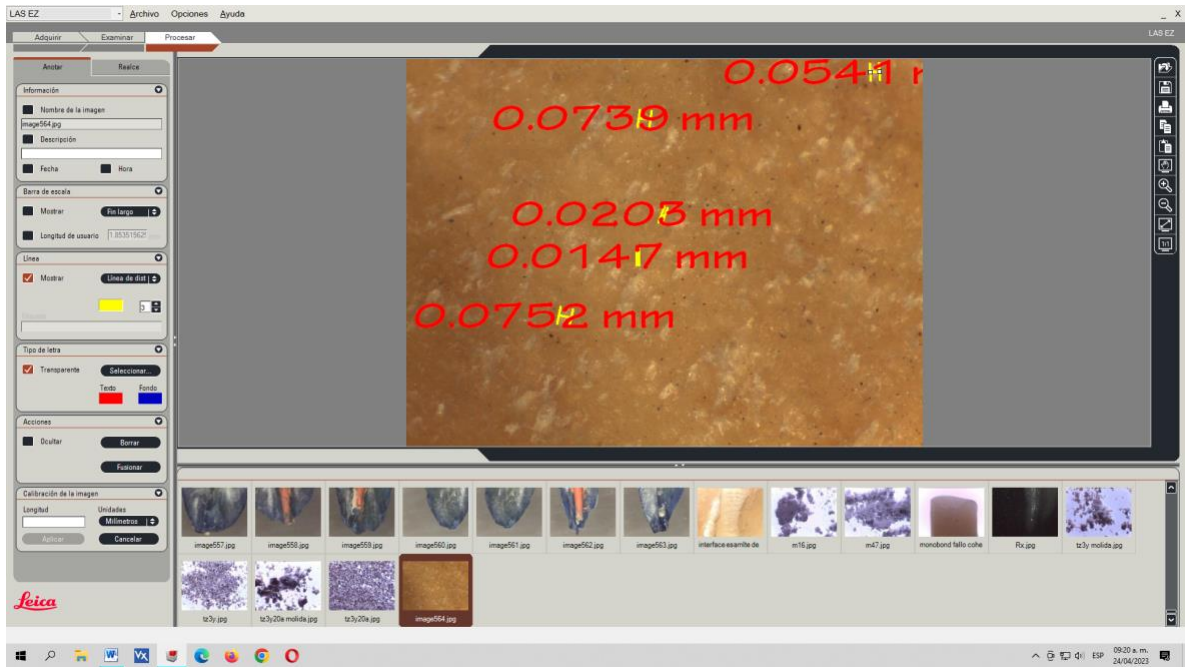


Figura 16 Aerogel de PMMA visto en una magnificación de 35x.

Fotografía tomada por el autor.

Los resultados de las imágenes tomadas por SEM (Scanning Electron Microscopy) o Microscopio electrónico de barrido nos muestran a un nivel Nanoscópico con una magnificación de 30,000x (Fig. 17) podemos ver que sus partículas tienen tamaños muy variables lo que hace que su estructura se asemeja a una red tridimensional o como se mencionaba múltiples canales que forman los poros y rugosidades que presenta como característica este material, dentro de la evaluación nanoscópica se hace la evaluación estructural de cada partícula tomando una muestra de 40-50 partículas para medir cada una de ellas y buscar una frecuencia (Tabla 1) (91, 92). En la (Fig. 18) de la muestra dos de igual forma se midieron y se colocaron en una tabla para su interpretación. (Tabla 2)

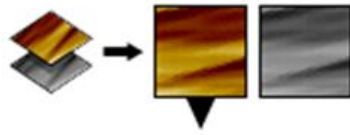
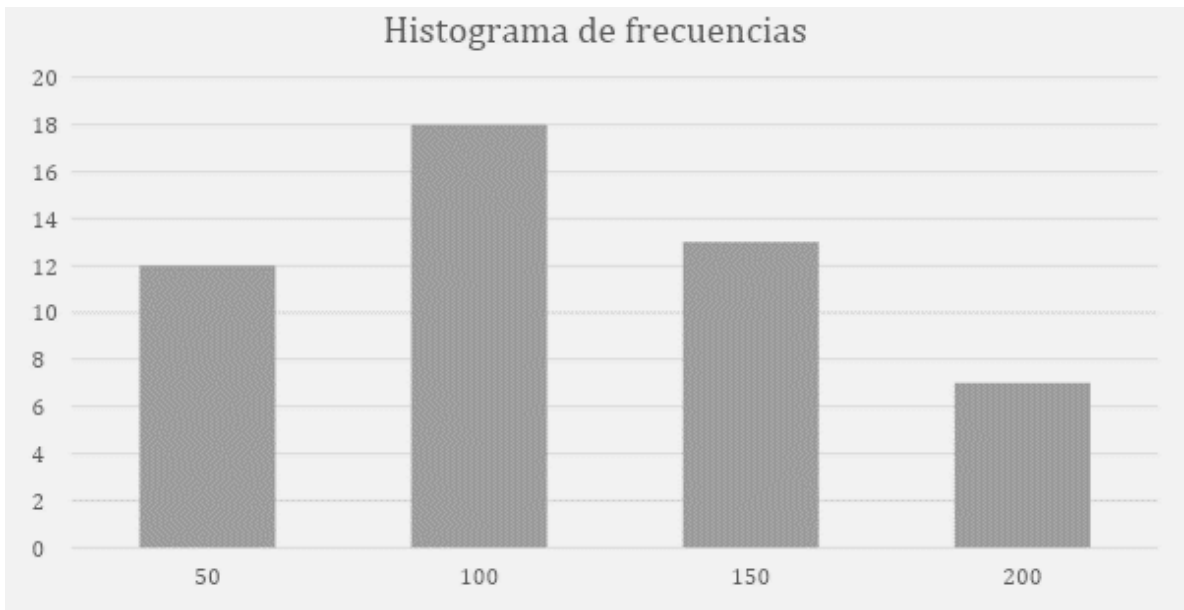


Figura 17 Captura de pantalla de muestra 1 de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, visto a una magnificación de 35,000x por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM).

Fotografía tomada por el Autor.



Tabla 1 Histograma de frecuencias del tamaño de las partículas tomando de referencia 20nm de la muestra 1.



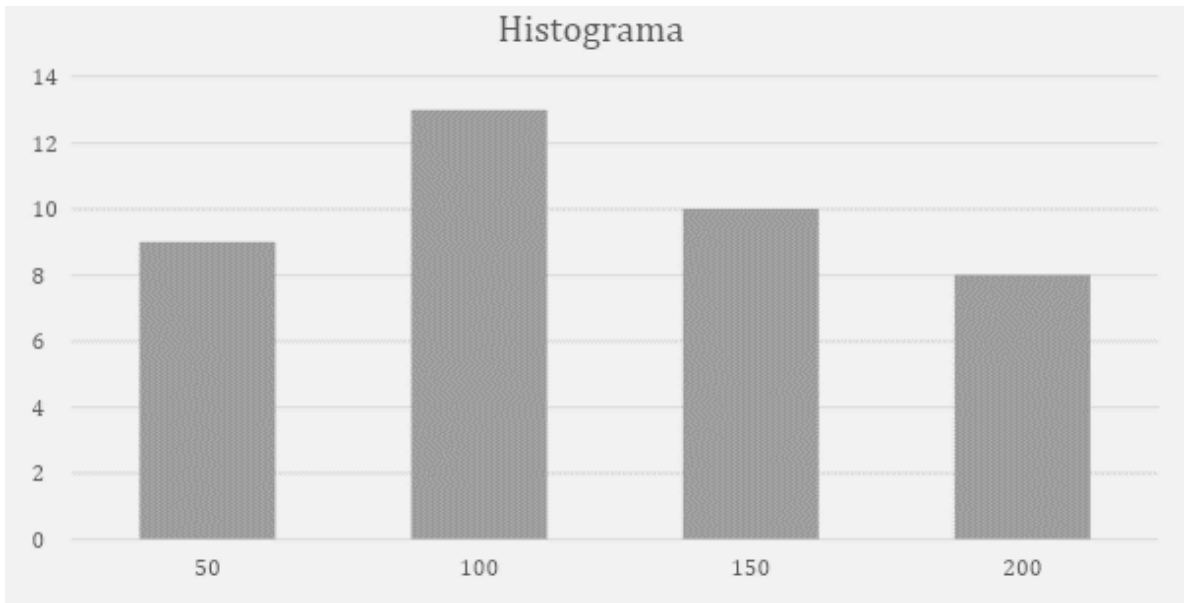
Diseño propio a partir de datos obtenidos.



Figura 18 Captura de pantalla de muestra 2 de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de calcio, visto a una magnificación de 35,000x por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM).

Fotografía tomada por el Autor.

Tabla 2 Histograma de frecuencias del tamaño de las partículas tomando de referencia 20nm de la muestra 2.



Diseño propio a partir de datos obtenidos.

Los resultados fueron variados entre la muestra 1 y 2 en microscopia como en nanoscópica (Tabla 3).

Tabla 3 Comparativa de características de microscópicas y características nanoscópicas de ambas muestras de Polimetilmetacrilato, Zinc y Carbonato de Calcio.

Microscopio	Nanoscópica
Menor resolución estructural	Mayor resolución estructural
Irrupción en la continuidad del material	Partículas separadas que forman porosidad
Se observa como una mineral	La estructura sólida se observa con la red 3D (disipada al secar el gas)
Rugosidad superficial	Rugosidad en toda la estructura
Filamentos o hebras de periferia hacia adentro	Tamaño expresado en NM de las partículas individuales del material
Color cobrizo	Color marrón o ladrillo.

## **CONCLUSIONES**

En esta investigación reportamos la caracterización de aerogeles de polimetilmetacrilato, en presencia de zinc y carbonato de calcio. La técnica propuesta presenta una gran versatilidad en la evaluación micro y nanoscópica de aerogeles. Los resultados obtenidos muestran una estructura a nivel nanoscópica de rugosidades con partículas entre 20 y 200 nm de diámetro. Estos resultados sugieren múltiples aplicaciones para ser usados en áreas como ortodoncia, biomateriales funcionales, ciencia de materiales entre otras.

## REFERENCIAS

1. H. CHM. Synthesis of Extracellular Matrix by Airlgel for Bone and Muscle Regeneration. *Journal of Materials Science and Engineering A*. 2017;7:315-9.
2. LC. K. Sol-Gel Glass Technology. A Review. *Board Certifed Forensic Expert*. 1981;62:7-14.
3. Meredith JE, Fazeli B, Schwartz MA. The extracellular matrix as a cell survival factor. *Molecular Biology of the Cell*. 1993;4(9):953-61.
4. Lu P, Takai K, Weaver VM, Werb Z. Extracellular Matrix Degradation and Remodeling in Development and Disease. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 2011;3(12):a005058-a.
5. A. M-EJC-MEM-YMA-CLT-GAL-MJR-C. Water Extractable Arabinoxylan aerogels prepared by Supercritical CO<sub>2</sub> drying. *Molecular Biology of the Cell*. 2013;5:1-45.
6. Mohite DP, Mahadik-Khanolkar S, Luo H, Lu H, Sotiriou-Leventis C, Leventis N. Polydicyclopentadiene aerogels grafted with PMMA: II. Nanoscopic characterization and origin of macroscopic deformation. *Soft Matter*. 2013;9(5):1531-9.
7. Abdul Khalil HPS, Jha K, Yahya EB, Panchal S, Patel N, Garai A, et al. Insights into the Potential of Biopolymeric Aerogels as an Advanced Soil-Fertilizer Delivery Systems. *Gels*. 2023;9(8).
8. Calvo V, Fuentes L, Berdejo D, González-Domínguez JM, Maser WK, Benito AM. Oil-in-Water Pickering Emulsions Stabilized with Nanostructured Biopolymers: A Venue for Templating Bacterial Cellulose. *Int J Mol Sci*. 2023;24(17).
9. Ajnsztajn A, Harikrishnan VVJ, Alahakoon SB, Zhu D, Barnes M, Daum J, et al. Synthesis and Additive Manufacturing of Hydrazone linked Covalent Organic Framework Aerogels. *Chemistry*. 2023:e202302304.
10. Chen C, Xiong L, Zhang X, Tian K, Dai Z, Fu Q, Deng H. Gradient heating induced better balance among water transportation, salt resistance and

heat supply in a high performance multi-functional solar-thermal desalination device. *Mater Horiz.* 2023.

11. Di A, Schiele C, Hadi SE, Bergström L. Thermally Insulating and Moisture-Resilient Foams Based on Upcycled Aramid Nanofibers and Nanocellulose. *Adv Mater.* 2023:e2305195.
12. Chen L, Qu N, Lu H, Jiang S, Zhang B, Hasi QM, Zhang Y. Preparation of a Magnetic Core-Shell Bioreactor for Oil/Water Separation and Biodegradation. *Langmuir.* 2023.
13. Fabrizioli P, Bürgi T, Burgener M, van Doorslaer S, Baiker A. Synthesis, structural and chemical properties of iron oxide–silica aerogels. *Journal of Materials Chemistry.* 2002;12(3):619-30.
14. Ippolito S, Gogotsi Y. 3D aerogels from hybrid 2D materials: ultralight and flexible superinsulators. *Natl Sci Rev.* 2023;10(10):nwad196.
15. Kim S, Shin H, Lee J, Park C, Ahn Y, Cho HJ, et al. Three-Dimensional MoS. *ACS Nano.* 2023;17(19):19387-97.
16. Boso D, Maghin E, Carraro E, Giagante M, Pavan P, Piccoli M. Extracellular Matrix-Derived Hydrogels as Biomaterial for Different Skeletal Muscle Tissue Replacements. *Materials.* 2020;13(11):2483.
17. Shi F, Wang L, Liu J. Synthesis and Characterization of Silica Aerogels by a Novel Fast Ambient Pressure Drying Process. *Materials Letters.* 2006;60.
18. Tan Z, Yoo CG, Yang D, Liu W, Qiu X, Zheng D. "Rigid-Flexible" Anisotropic Biomass-Derived Aerogels with Superior Mechanical Properties for Oil Recovery and Thermal Insulation. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2023;15(35):42080-93.
19. Wang H, Chen Y, Mo M, Dorsel PP, Wu C. Visualized adsorption and enhanced photocatalytic removal of Cr. *Int J Biol Macromol.* 2023;253(Pt 5):127206.
20. Chamoli SK, Li W. Visibly transparent multifunctional camouflage coating with efficient thermal management. *Opt Lett.* 2023;48(16):4340-3.
21. Hough LA, Islam MF, Hammouda B, Yodh AG, Heiney PA. Structure of semidilute single-wall carbon nanotube suspensions and gels. *Nano Lett.* 2006;6(2):313-7.



22. Sharma K, Kaur M, Tewatia P, Kumar V, Paulik C, Yoshitake H, et al. Ultra-sensitive detection and scavenging of arsenic ions and ciprofloxacin using 3D multipurpose hemicellulose based aerogel: Adsorption mechanism and RSM optimization. *Bioresour Technol.* 2023;389:129825.
23. Sharma SK, Ranjani P, Mamane H, Kumar R. Preparation of graphene oxide-doped silica aerogel using supercritical method for efficient removal of emerging pollutants from wastewater. *Sci Rep.* 2023;13(1):16448.
24. Borella L, Rozo A, Perfetti C, Iorio CS. Characterization of Composite Freeze-Dried Aerogels with Simulant Lunar Regolith for Space Applications. *Materials (Basel).* 2023;16(17).
25. Fu H, Huang H, Chen Y, Jiang K, Lai F, Chen C, et al. Lattice-strained Metallic Aerogels as Efficient and Anti-poisoning Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction. *ChemSusChem.* 2023:e202301221.
26. Su X, Wang J, Han M, Liu Y, Zhang B, Huo S, et al. Broadband electromagnetic wave absorption using pure carbon aerogel by synergistically modulating propagation path and carbonization degree. *J Colloid Interface Sci.* 2023;652(Pt A):780-8.
27. Sun J, Zhang J, Peng X, Zhang X, Yuan Z, Liu X, et al. Carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol composite aerogel supported beta molecular sieve for CH. *Carbohydr Polym.* 2023;321:121246.
28. Tang H, Ang Chen Z, Wu M, Li S, Ye Z, Zhi M. Au-CeO. *J Colloid Interface Sci.* 2023;653(Pt A):316-26.
29. Wang J, Liang C, Ma X, Liu P, Pan W, Zhu H, et al. Dynamically Adaptive Bubbling for Upgrading Oxygen Evolution Reaction Using Lamellar Fern-Like Alloy Aerogel Self-Standing Electrodes. *Adv Mater.* 2023:e2307925.
30. Wu Z, Yao X, Xing Y. A Review of Nitrogen-Doped Graphene Aerogel in Electromagnetic Wave Absorption. *Micromachines (Basel).* 2023;14(9).
31. Xue C, Ma J, Chen X, Liu D, Huang W. Efficient degradation of 2,4-dichlorophenol by heterogeneous electro-Fenton using bulk carbon aerogels modified in situ with FeCo-LDH as cathodes: Operational parameters and mechanism exploration. *J Environ Manage.* 2023;347:119114.
32. Xue Z, Ru Y, Wang Z, Li Q, Yu M, Li J, Sun H. A 3D-printed freestanding graphene aerogel composite photocathode for high-capacity and long-life photo-assisted Li-O. *Nanoscale.* 2023;15(36):14877-85.

33. Xue J, Wang P, Cheng W, Shi L, Bi Q. Preparation and performance of aerogel-based BiOI/TiO<sub>2</sub>. *Phys Chem Chem Phys*. 2023;25(35):23761-9.
34. Liu S, Wang S, Shuai S, Weng Y, Zheng F. Efficient Solar Desalination of Seawater Using a Novel Carbon Nanotube-Based Composite Aerogel. *Materials (Basel)*. 2023;16(17).
35. Ma H, Yu L, Li Z, Chen J, Meng J, Song Q, et al. A Lotus Seedpods-Inspired Interfacial Solar Steam Generator with Outstanding Salt Tolerance and Mechanical Properties for Efficient and Stable Seawater Desalination. *Small*. 2023:e2304877.
36. Ransing AA, Dhavale RP, Parale VG, Bangi UKH, Choi H, Lee W, et al. One-Pot Sol-Gel Synthesis of Highly Insulative Hybrid P(AAm-CO-AAc)-Silica Aerogels with Improved Mechanical and Thermal Properties. *Gels*. 2023;9(8).
37. Zhao S, Wei H, Zhang X, Wang F, Su Z. Clay-based aerogel combined with CuS for solar-driven interfacial steam generation and desalination. *J Colloid Interface Sci*. 2023;653(Pt B):1504-13.
38. Montes S, Maleki H. 12 - Aerogels and their applications. In: Thomas S, Tresa Sunny A, Velayudhan P, editors. *Colloidal Metal Oxide Nanoparticles*: Elsevier; 2020. p. 337-99.
39. Reale Batista MD, Troksa AL, Eshelman HV, Bagge-Hansen M, Roehling JD. All-day passive radiative cooling using common salts. *Mater Horiz*. 2023.
40. Zhang G, Li C, Wang Y, Lin L, Ostrikov KK. High-Performance Methylsilsesquioxane Aerogels: Hydrolysis Mechanisms and Maximizing Compression Properties. *Gels*. 2023;9(9).
41. Amidi M, Salehi E. Calcined Chitosan/Cellulose Aerogel Modified with Copper Oxide Nanoparticles as an Efficient Sorbent for the Optimized Removal of Formic Acid from Water. *ACS Appl Bio Mater*. 2023.
42. Morgan LM, Loche D, Corrias A, Hayama S, Mountjoy G. Using Ex Situ and In Situ HERFD-XANES to Reveal the Superior Oxidation and Reduction Cycling of Ceria Nanocubes Dispersed in Silica Aerogel. *J Phys Chem C Nanomater Interfaces*. 2023;127(39):19554-62.
43. An Y, Zhang W, Zhang X, Zhong Y, Ding L, Hao Y, et al. Adsorption Recycling and High-Value Reutilization of Heavy-Metal Ions from

- Wastewater: As a High-Performance Anode Lithium Battery. *Langmuir*. 2023;39(35):12324-35.
44. Dong H, Li X, Cai Z, Wei S, Fan S, Ge Y, Wu Y. Strong, Lightweight, and Shape-Memory Bamboo-Derived All-Cellulose Aerogels for Versatile Scaffolds of Sustainable Multifunctional Materials. *Small*. 2023:e2305857.
  45. Fang Z, Wang J, Xue Y, Khorasani Motlagh M, Noroozifar M, Kraatz HB. Palladium-Copper Bimetallic Aerogel as New Modifier for Highly Sensitive Determination of Bisphenol A in Real Samples. *Materials (Basel)*. 2023;16(18).
  46. Franco P, Aliakbarian B, perego p, Reverchon E, de marco I. Supercritical Adsorption of Quercetin on Aerogels for Active Packaging Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018;57.
  47. Ganguly A, Nag S, Gayen K. Synthesis of cellulosic and nano-cellulosic aerogel from lignocellulosic materials for diverse sustainable applications: a review. *Prep Biochem Biotechnol*. 2023:1-16.
  48. Gao B, Wei F, Yang H, Li J. Effective removal of Cr (VI) from aqueous solution by reinforced sodium alginate/polyethyleneimine/graphene oxide composite aerogels. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2023.
  49. Gao H, Soto MA, Li Z, Andrew LJ, MacLachlan MJ. Cellulose nanocrystal/halloysite nanotube composite aerogels for water purification. *Dalton Trans*. 2023;52(36):12968-77.
  50. Guo H, Niu T, Yu J, Wang X, Si Y. Phase-Tailoring W. *Small*. 2023:e2306170.
  51. Ghahremani P, Nezamzadeh-Ejhieh A, Vakili MH. A comparison of adsorption capacity of several synthesis methods of cellulose-based absorbent towards Pb(II) removal: Optimization with response surface methodology. *Int J Biol Macromol*. 2023;253(Pt 4):127115.
  52. Hsan N, Kumar S, Koh J, Dutta PK. Chitosan modified multi-walled carbon nanotubes and arginine aerogel for enhanced carbon capture. *Int J Biol Macromol*. 2023;252:126523.
  53. Hui S, Ji R, Zhang H, Huang C, Xu F, Sun L, et al. N-Octadecane Encapsulated by Assembled BN/GO Aerogels for Highly Improved Thermal Conductivity and Energy Storage Capacity. *Nanomaterials (Basel)*. 2023;13(16).

54. Bera T, Manna S, Sharma AK, Bahukhandi K, Sharma M, Bhunia B. Repurposing the single-used-plastic for development of hydrophobic aerogels for remediation of oil spill and organic solvents. *Sci Total Environ.* 2023;903:166670.
55. Chen ZY, Wang RD, Su SL, Hao YL, Zhou F. Green synthesis of metal-organic framework loaded dexamethasone on wood aerogels for enhanced cranial bone regeneration. *J Mater Chem B.* 2023;11(39):9496-508.
56. Dos Santos-Gómez L, Rey-Raap N, García-Granda S, Arenillas A. CuO metallic aerogels with a tailored nodular morphology. *Dalton Trans.* 2023.
57. Guo X, Zhang Y, Xia H, Chen J, Zhu Z, Qi J, Li X. Waste biomass-derived N, P co-doping carbon aerogel-coated Co. *J Colloid Interface Sci.* 2023;652(Pt A):174-83.
58. Jing Z, Li Y, Du Q, Pi X, Wang Y, Zhao S, Jin Y. Green preparation of magnetic ferroferric oxide-polyvinyl alcohol-alginate coated UiO-67 nanospheres: Characterization, adsorption properties and adsorption mechanism of methylene blue. *Int J Biol Macromol.* 2023;253(Pt 3):126967.
59. Li J, Jing Y, Qiao M, Yan L, Long Y, Liu Z, et al. 3D porous  $\beta$ -cyclodextrin grafted graphene oxide/sodium alginate superhydrophilic natural polysaccharide-based aerogel for solar steam generation. *Int J Biol Macromol.* 2023:127338.
60. Li L, Xu T, Zhang F, Du C, He S. Preparation of Super-Flexible Silica Aerogel and Its Application in Oil-Water Separation. *Gels.* 2023;9(9).
61. Li L, Zhou Y, Gao Y, Feng X, Zhang F, Li W, et al. Large-scale assembly of isotropic nanofiber aerogels based on columnar-equiaxed crystal transition. *Nat Commun.* 2023;14(1):5410.
62. Troyano J, Tayier F, Phattharaphuti P, Aoyama T, Urayama K, Furukawa S. Porous supramolecular gels produced by reversible self-gelation of ruthenium-based metal-organic polyhedra. *Chem Sci.* 2023;14(35):9543-52.
63. Ulrich TA, de Juan Pardo EM, Kumar S. The mechanical rigidity of the extracellular matrix regulates the structure, motility, and proliferation of glioma cells. *Cancer Res.* 2009;69(10):4167-74.

64. Muñoz-Ruíz A, Escobar-García D, Quintana M, Pozos-Guillen A, Flores H. Synthesis and Characterization of a New Collagen-Alginate Aerogel for Tissue Engineering. *Journal of Nanomaterials*. 2019;2019:1-10.
65. Yu D, Liu L, Yu J, Si Y, Ding B. Meta-Aerogel Electric Trap Enables Instant and Continuable Pathogen Killing in Face Masks. *ACS Nano*. 2023.
66. Zhang Z, Zhou B, Jia M, Wu C, Niu T, Feng C, et al. Einstein's tea leaf paradox induced localized aggregation of nanoparticles and their conversion to gold aerogels. *Sci Adv*. 2023;9(37):eadi9108.
67. Zhou T, Xu Y, Zhen Y, Wu K, Ding H, Wang L, et al. Layered Inorganic Silicate Aerogel Pillared by Nanoclusters for High Temperature Thermal Insulation. *Adv Mater*. 2023:e2306135.
68. García Ramírez VM, García Murillo A, Carrillo Romo FJ, Alvarez González RI, Madrigal Bujaidar E. A New Ultrafine Luminescent La. Gels. 2023;9(8).
69. Honarmandrad Z, Kaykhaii M, Gębicki J. Microplastics removal from aqueous environment by metal organic frameworks. *BMC Chem*. 2023;17(1):122.
70. Kurmysheva AY, Yanushevich O, Krikheli N, Kramar O, Vedenyapina MD, Podrabinnik P, et al. Adsorption Ability of Graphene Aerogel and Reduced Graphene Aerogel toward 2,4-D Herbicide and Salicylic Acid. *Gels*. 2023;9(9).
71. Li X, Zhu L, Kasuga T, Nogi M, Koga H. All-Nanochitin-Derived, Super-Compressible, Elastic, and Robust Carbon Honeycombs and Their Pressure-Sensing Properties over an Ultrawide Temperature Range. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2023;15(35):41732-42.
72. Li Z, Shen K, Hu M, Shulga YM, Chen Z, Liu Q, et al. Heat-Treated Aramid Pulp/Silica Aerogel Composites with Improved Thermal Stability and Thermal Insulation. *Gels*. 2023;9(9).
73. Li Z, Yu L, Ma H, Chen J, Meng J, Wang Y, et al. An efficient interfacial solar evaporator featuring a hierarchical porous structure entirely derived from waste cotton. *Sci Total Environ*. 2023;903:166212.
74. Ahn SY, Yu C, Song YS. Cellulose Nanocrystal Embedded Composite Foam and Its Carbonization for Energy Application. *Polymers (Basel)*. 2023;15(16).

75. Neale ZG, Lefler MJ, Long JW, Rolison DR, Sassin MB, Carter R. Freestanding carbon nanofoam papers with tunable porosity as lithium-sulfur battery cathodes. *Nanoscale*. 2023.
76. Pan T, Cui X. Gelatin aerogel with good mechanical properties and adjustable physical properties for boron adsorption from salt lake brines: An optimized process. *Int J Biol Macromol*. 2023;251:126403.
77. Zheng L, Zhang S, Ying Z, Liu J, Zhou Y, Chen F. <p>Engineering of Aerogel-Based Biomaterials for Biomedical Applications</p>. *International Journal of Nanomedicine*. 2020;Volume 15:2363-78.
78. Wang J, Luo Y, Yu H, Guo Z, Yang J, Xue Y, et al. One-pot self-assembled bimetallic sulfide particle cluster-supported three-dimensional graphene aerogel as an efficient electrocatalyst for the oxygen evolution reaction. *Phys Chem Chem Phys*. 2023;25(38):26298-307.
79. Yannas IV, Lee E, Orgill DP, Skrabut EM, Murphy GF. Synthesis and characterization of a model extracellular matrix that induces partial regeneration of adult mammalian skin. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1989;86(3):933-7.
80. Zhu P, Yu Z, Sun H, Zheng D, Zheng Y, Qian Y, et al. 3D Printed Cellulose Nanofiber Aerogel Scaffold with Hierarchical Porous Structures for Fast Solar-driven Atmospheric Water Harvesting. *Adv Mater*. 2023:e2306653.
81. Reyes A, Calleja A, Gil-Guillén I, Benito-González I. Optimization and characterization of reinforced biodegradable cellulose-based aerogels via polylactic acid/polyhydroxybutyrate coating. *Int J Biol Macromol*. 2023;253(Pt 5):127224.
82. Lázár I, Čelko L, Menelaou M. Aerogel-Based Materials in Bone and Cartilage Tissue Engineering-A Review with Future Implications. *Gels*. 2023;9(9).
83. Lončarević A, Malbaša Z, Kovačić M, Ostojić K, Anđić A, Skoko Ž, et al. Copper-zinc/chitosan complex hydrogels: Rheological, degradation and biological properties. *Int J Biol Macromol*. 2023;251:126373.
84. Wang B, Zhang H, Yang X, Tian T, Bai Z. Facile construction of multifunctional bio-aerogel for efficient separation of surfactant-stabilized oil-in-water emulsions and co-existing organic pollutant. *J Hazard Mater*. 2023;461:132434.

85. Wang Y, Ma D, Deng Z, Peng Y, Liu B, Wang X, et al. Revealing Disparities in Porous Networks Between Yttria Aerogel Assemblies with Nanosheets and Nanoparticles and Their Ultrathermal Insulation and Optical Properties. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2023;15(35):41880-91.
86. Jin R, Zhou Z, Liu J, Shi B, Zhou N, Wang X, et al. Aerogels for Thermal Protection and Their Application in Aerospace. *Gels*. 2023;9(8).
87. Yu H, Li M, Deng Y, Fu S, Guo J, Zhao H, et al. Chemically bonded multi-nanolayer inorganic aerogel with a record-low thermal conductivity in a vacuum. *Natl Sci Rev*. 2023;10(10):nwad129.
88. Zhou K, Wang Y, Mei J, Zhang X, Xue T, Fan W, et al. Scalable Preparation of Polyimide Sandwiched Separator for Durable High-Rate Lithium-Metal Battery. *Small*. 2023:e2305596.
89. Xu L, Zhu W, Chen Z, Su D. Double-Network MK Resin-Modified Silica Aerogels for High-Temperature Thermal Insulation. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2023;15(37):44238-47.
90. Xiang J, Wang S, Chen N, Wen X, Tian G, Zhang L, et al. Study on Low Thermal-Conductivity of PVDF@SiAG/PET Membranes for Direct Contact Membrane Distillation Application. *Membranes (Basel)*. 2023;13(9).
91. Zhi M, Tang H, Wu M, Ouyang C, Hong Z, Wu N. Synthesis and Photocatalysis of Metal Oxide Aerogels: A Review. *Energy & Fuels*. 2022;36(19):11359-79.
92. Lermontov SA, Vlasenko NE, Sipyagina NA, Malkova AN, Gozhikova IO, Baranchikov AE, Knerelman EI. Highly Porous Para-Aramid Aerogel as a Heterogeneous Catalyst for Selective Hydrogenation of Unsaturated Organic Compounds. *Polymers (Basel)*. 2023;15(15).