

# **UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN  
ENERGÍAS RENOVABLES  
INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

## **TESIS**

**“MODIFICACIÓN DE MATRICES DE TEOS  
CON ÓXIDO DE GALIO PARA SU POSIBLE  
APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE CO<sub>2</sub>”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**PRESENTA  
ROGERS GARCIA DOMINGUEZ**

**DIRECTORES DE TESIS  
DR. HEBER VILCHIS BRAVO  
DR. FRANCISCO SEBASTIAN RAMIREZ GONZALEZ**

TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS

AGOSTO DE 2024





**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE  
CHIAPAS**

**DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES**

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Fecha: 03 de septiembre de 2024

C. Dra. Bianca Yadira Perez Sariñana

Director de: Programa Educativo de Ingeniería en Energías Renovables

Presente

Adjunto al presente me permito enviar a usted relación debidamente requisitada, con la cual hago de su conocimiento y compruebo que he entregado un ejemplar denominado:

"Modificación de matrices de TEOS con óxido de galio para su posible aplicación en la detección de  $CO_2$ .

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Impreso y en electrónico que me fue autorizado, a efecto de que proceda con el trámite a que haya lugar.

ATENTAMENTE

  
Rogers García Domínguez

Nombre y firma del (la) Sustentante  
No. de matrícula 63120010

CCP. Expediente

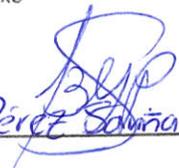




UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE  
CHIAPAS  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

Anexo

Unidad  
Académica:

  
Blanca Lidia Pérez Samirano

~~1 Impreso~~ y un electrónico

Biblioteca:

1 Electrónico

Presidente:

  
Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

1 impreso

Secretario:

Ma. Rosario Herrera R.  
Dra. María del Rosario Herrera Rivera

1 impreso

Vocal:

  
Dr. Heber Vilchis Bravo

1 impreso



Rogers García Domínguez

Nombre y firma del (la) Sustentante  
No. de matrícula 63120010



**Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas**  
**Dirección de Servicios Escolares**  
**Departamento de Certificación Escolar**  
Autorización de impresión



Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
Fecha: 03 de septiembre de 2024

C. Rogers García Domínguez

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería en Energías Renovables

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Modificación de matrices de TEOS con óxido de galio para su posible aplicación en la

detección de CO<sub>2</sub>

En la modalidad Tesis  
de:

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

**Revisores**

Dra. María del Rosario Herrera Rivera

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Dr. Heber Vilchis Bravo

Dr. Francisco Sebastián Ramírez González

**Firmas:**

Ma Rosario Herrera R.

Rubén Vázquez

Heber Vilchis

Francisco Ramírez

Ccp Expediente



# Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por darme la sabiduría y el conocimiento, por guiarme y acompañarme en este camino. Sin Su gracia y fortaleza, no habría podido superar los desafíos y alcanzar mis metas.

A mi mamá, Ylce Domínguez, por apoyarme en cada momento, por enseñarme a ser una persona de bien e instruirme de la mejor manera, por enseñarme que sin Dios no soy nada. Agradezco profundamente porque siempre estuvo ahí para verme triunfar y fracasar, para verme reír y llorar, y por ser mi pilar de fortaleza y amor incondicional. Gracias, mamá, por cada sacrificio y cada palabra de aliento.

A mi papá Rogerd Garcia, por ayudarme en todo momento. Aunque nuestra conexión emocional no siempre fue fuerte yo sé que está muy orgulloso de mi, siempre supe que podía contar con su apoyo. Agradezco su presencia constante y su respaldo en este importante viaje de mi vida.

A mi hermana, Ylce Guadalupe, quien, a pesar de la distancia, siempre la llevo en mi corazón. Gracias por tu ayuda en todo momento y por estar presente en mi vida, demostrando que el amor fraternal trasciende cualquier barrera geográfica.

A mi hermana, Daniela, quien siempre me enseñó a ser fuerte y valiente, a salir adelante y, sobre todo, a nunca rendirme. Gracias por ser una fuente constante de inspiración y apoyo.

A mi hermana, Citlali, quien siempre estuvo ahí para escucharme, aconsejarme y apoyarme en mis peores momentos. Gracias por ser mi protectora y por ayudarme a lo largo de este camino.

A mi hermano, Endi, con quien siempre bromeaba y reía. Gracias por esos momentos de juego y distracción, y por nuestras divertidas peleas que siempre aligeraban cualquier día difícil.

A mis sobrinas, Mayte y Lía, quienes son muy cercanas a mí. Gracias, mis pequeñas, por estar presentes para sacarme una sonrisa o, en ocasiones, un coraje, pero que amo con todo mi corazón.

A mis sobrinos, Jhoanna, Iván y Juli, con quienes conviví en ciertas temporadas. Cada momento con ustedes fue una aventura y los quiero con todo mi corazón.

A mis amigos de la infancia, Carlos, Jatziri, Floricel e Ismerai. Gracias por los momentos compartidos, las charlas sobre la escuela y por siempre animarme a seguir adelante. Su apoyo constante significó mucho para mí.

A mi amiga Anshy Maydeli, mi amiga más personal y de la infancia. Aunque no hemos estado presentes físicamente y no nos hemos visto en mucho tiempo, siempre estuviste en contacto conmigo y me animaste cuando ya no podía más. Gracias por tu amistad incondicional.

A mis amigos más recientes, Ilse y Ander, quienes son grandes amigos y mis odontólogos favoritos. Gracias por hacerme sentir más a gusto aquí en Tuxtla, lejos de casa. Su apoyo en mis estudios y la compañía en momentos grandiosos, como salir a cenar, ir al parque e incluso a la iglesia, hicieron esta experiencia inolvidable.

A mis amigos y compañeros de la universidad, Alessandra, Ana Cristina y Cristian. Desde el inicio formamos un lazo de amistad y fuimos inseparables. Gracias por los grandes equipos que formamos, el tiempo de calidad compartido y por ser ese grupo al que cariñosamente llamamos "Reales".

No quiero pasar por alto a los doctores Heber Vilchis y Francisco Ramírez, quienes me dieron la oportunidad de trabajar junto a ellos y despertar en mí la pasión por el mundo de la investigación. Gracias por su guía y apoyo en este camino.

## Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres, quienes con mucho esfuerzo y sacrificio me dieron la oportunidad de cumplir mis metas.

A mi mamá, quien siempre estuvo muy cerca de mí. Me protegió y cuidó, me enseñó a ser una persona de bien y me guio por el mejor camino. Me inculcó los valores de Dios y a confiar en Él. Agradezco profundamente todo el esfuerzo que hizo cada día, las desveladas cuando me sentía enfermo, los momentos en que llegaba llorando porque no podía más, y las veces que me sentía triste. Siempre estuviste ahí para mí en todo momento, madre. Todo este trabajo es gracias a ti y para ti. Te amo con todo mi corazón.

A mi papá, quien, aunque no fue totalmente unido emocionalmente, quiero mucho. Tal vez no puede expresar sus sentimientos, pero sé que te sientes orgulloso de cada logro que he alcanzado en mi vida. Gracias por respaldarme completamente. Te dedico este trabajo a ti, quien con mucho esfuerzo ibas todos los días a trabajar con el fin de que nada nos faltara. Aunque a veces no sabías cómo ibas a suplir ciertas cosas, siempre buscabas la manera y nunca te rendiste. Aquí está el fruto de tu esfuerzo.

Ambos hicieron un buen equipo y alcanzaron su meta conmigo. Muchas gracias por ser parte de mi vida. Los amo profundamente.

*"Nunca dudes de ti mismo ni desperdices un segundo de tu vida. Es demasiado corta y eres demasiado especial."*

*(Ariana Grande)*

## Tabla de contenido

Agradecimientos.....	3
Dedicatoria .....	5
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	10
1.1 Introducción .....	11
1.2 Planteamiento del problema .....	12
1.3 Objetivo .....	12
1.3.1 Objetivos específicos .....	12
1.4 Hipótesis.....	13
1.5 Metodología.....	13
1.6 Estado del arte.....	14
1.6.1 Tetraetilortosilicato .....	14
1.6.2 Óxido de galio .....	15
1.6.3 Detección de CO <sub>2</sub> .....	16
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	17
2.1 Tetraetilortosilicato.....	18
2.1.1 Origen .....	18
2.1.2 Producción de TEOS .....	19
2.1.3 Reacciones de esterificación.....	20
2.1.4 Aplicaciones.....	20
2.2 Óxido de galio.....	22
2.2.1 Propiedades físicas y químicas.....	23

2.2.2 Fases del óxido de galio.....	23
2.2.3 Aplicaciones.....	30
2.3 Dióxido de carbono.....	32
2.3.1 Propiedades químicas y físicas.....	32
2.3.2 Efectos del dióxido de carbono en el medio ambiente .....	33
2.4 Tecnologías de detección de CO <sub>2</sub> .....	36
2.4.1 Tipo de sensores de CO <sub>2</sub> .....	36
2.4.2 Aplicaciones actuales y avances tecnológicos en la detección de CO <sub>2</sub> .....	37
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	38
3.1 Preparación del TEOS.....	39
3.1.1 Materiales y reactivos: .....	39
3.1.2 Método de preparación .....	39
3.2 Síntesis de óxido de galio .....	41
3.2.1 Materiales y reactivos: .....	41
3.2.2 Método de preparación .....	41
3.3 Síntesis de TEOS modificado con óxido de galio.....	46
3.3.1 Materiales y reactivos .....	46
3.3.2 Método de preparación .....	46
3.3.3 Fabricación de las muestras .....	48
3.4 Sensor resistivo .....	48
3.3.4 Caracterización de materiales.....	50

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	53
4.1 Caracterización estructural .....	54
4.2 Caracterización composicional .....	55
4.3 Caracterización morfológica.....	57
4.4 Detección de CO <sub>2</sub> .....	61
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....	64
5.1 Conclusiones generales.....	65
5.2 Trabajo a futuro .....	66
Bibliografía .....	67

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan aspectos generales para contextualizar el presente trabajo de investigación. Se muestra la introducción, los antecedentes del estudio, la problemática a resolver, los objetivos de la investigación, la justificación del estudio y la hipótesis planteada. Este marco teórico establece las bases necesarias para comprender la importancia y el alcance del proyecto, así como su relevancia en el contexto de la detección de CO<sub>2</sub> mediante la modificación de matrices de TEOS (Tetraetilortosilicato) con óxido de galio.

## 1.1 Introducción

En las últimas décadas, el monitoreo de gases ha cobrado una importancia vital debido a su impacto en la salud humana y el medio ambiente. El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), en particular, es un gas de efecto invernadero que contribuye significativamente al cambio climático y, en altas concentraciones, puede afectar negativamente la salud. Por lo tanto, el desarrollo de sensores precisos, eficientes y económicos para la detección de  $\text{CO}_2$  es una prioridad en la investigación científica y tecnológica. El óxido de galio ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) ha emergido como un material prometedor para aplicaciones en sensores de gas debido a sus propiedades semiconductoras, alta estabilidad térmica y capacidad para adsorber gases.

Su amplia banda prohibida y la movilidad de portadores de carga hacen de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  un material adecuado para la detección de gases en condiciones exigentes. Sin embargo, para mejorar la sensibilidad y selectividad del  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , es esencial integrarlo en una matriz que maximice su área superficial y facilite la interacción con las moléculas de gas. El tetraetilortosilicato (TEOS) es un precursor químico que, mediante procesos de sol-gel, puede formar estructuras de sílice altamente porosas. Estas estructuras proporcionan una amplia superficie específica y canales adecuados para la difusión de gases, lo que las hace ideales para soportar materiales activos como el  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . La adición de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  en una matriz de TEOS combina las propiedades semiconductoras del óxido de galio con la alta porosidad y estabilidad mecánica de la sílice, resultando en sensores con mejor rendimiento en términos de sensibilidad y selectividad para la detección de  $\text{CO}_2$ .

Este trabajo se centra en la síntesis y caracterización de una matriz de TEOS infiltrada con  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , evaluando sus propiedades estructurales, morfológicas, y sensoriales. A través de la técnica de síntesis, se busca optimizar las condiciones para obtener el material. Por otro lado, se propone su posible aplicación en la fabricación de sensores que respondan eficazmente a la presencia de  $\text{CO}_2$ .

## 1.2 Planteamiento del problema

El tetraetilortosilicato (TEOS) es un precursor químico que, mediante el proceso sol-gel, puede formar estructuras de sílice altamente porosas. Estas estructuras podrían proporcionar una gran superficie específica y canales adecuados para la difusión de gases, lo que las hace ideales para soportar materiales activos como el óxido de galio ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ). Por otro lado, el ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) ha emergido como un material prometedor para la detección de gases debido a sus propiedades semiconductoras y su alta estabilidad térmica. El problema radica en la búsqueda de condiciones de síntesis que permitan la síntesis de TEOS infiltrado con  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Este trabajo se propone abordar estas brechas de conocimiento mediante la investigación de la síntesis y caracterización de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  infiltrado en TEOS, además de evaluar su desempeño en la detección de  $\text{CO}_2$ .

## 1.3 Objetivo

Determinar las condiciones experimentales que permitan sintetizar matrices de TEOS modificadas mediante la infiltración de óxido de galio ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ), y evaluar su posible aplicación en la detección de  $\text{CO}_2$ .

### 1.3.1 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones experimentales para sintetizar TEOS.
- Reproducir las condiciones experimentales para obtener óxido de galio a partir de la oxidación térmica de arseniuro de galio.
- Determinar las condiciones experimentales para modificar el TEOS con óxido de galio.
- Evaluar la estructura, composición y morfología de las muestras fabricadas.
- Evaluar, sí, el TEOS modificado puede ser empleado en la detección de  $\text{CO}_2$  mediante la fabricación de un dispositivo sensor resistivo con TEOS modificado.

## 1.4 Hipótesis

Es posible realizar la modificación de la matriz amorfa de TEOS con óxido de galio (material cristalino) para obtener un material híbrido, con posible aplicación en la detección de CO<sub>2</sub>. Por un lado, el TEOS aportará su capacidad de recubrimiento y gran área superficial, por otro lado, el óxido de galio aportará los “puntos calientes” para detectar la fisisorción del gas objetivo sobre la superficie del material. Estas estructuras proporcionan una gran superficie específica (puntos “calientes”) de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adecuados, para la fisisorción de CO<sub>2</sub>. La infiltración de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en una matriz de TEOS podría mejorar significativamente la sensibilidad y selectividad de un sensor del tipo resistivo, para la detección de CO<sub>2</sub>.

## 1.5 Metodología

Este trabajo de tesis se realiza primordialmente de forma experimental. El diseño de los primeros experimentos se basa en una revisión bibliográfica de los aspectos generales relacionados con la síntesis de TEOS, y con la obtención de óxido de galio mediante la conversión térmica de arseniuro de galio. Los experimentos inician con el aprendizaje de la síntesis de TEOS, comprobando la obtención del material mediante difracción de rayos X (DRX) e imágenes topográficas, obtenidas mediante microscopia de fuerza atómica (AFM). Por otro lado, se diseñaron experimentos para obtener polvo de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir de la conversión térmica de arseniuro de galio, la calidad del material obtenido se estudió mediante DRX. Posteriormente, se propusieron experimentos que permitieran modificar la matriz de TEOS mediante la infiltración de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Las muestras obtenidas se caracterizaron estructural, composicional y morfológicamente para comprobar y concluir con las condiciones de síntesis que permiten la modificación adecuadamente. Finalmente, se evaluó la aplicación del TEOS modificado con Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para su aplicación en la detección de CO<sub>2</sub>, para lo cual se fabricó un sensor tipo resistivo, que fue expuesto a CO<sub>2</sub>. La detección se basó en cambios de corriente asociados a la presencia del gas.

## 1.6 Estado del arte

### 1.6.1 Tetraetilortosilicato

El Tetraetilortosilicato, conocido simplemente como TEOS, es un compuesto químico utilizado principalmente como precursor en la síntesis de sílice (dióxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ ) y en la fabricación de recubrimientos y películas delgadas de sílice en aplicaciones tecnológicas. Químicamente, el Tetraetilortosilicato consiste en un átomo de silicio (Si) rodeado por cuatro grupos etilo ( $\text{C}_2\text{H}_5$ ) unidos a través de enlaces covalentes, resultando en la fórmula química  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ . El TEOS es un líquido claro e incoloro con un ligero olor característico. Tiene una baja viscosidad y es soluble en disolventes orgánicos como el etanol (Nguyen Thuy et al., 2022).

El compuesto es inflamable y debe manejarse con cuidado. Uso en la fabricación de sílice: El TEOS se utiliza principalmente como precursor en la producción de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Cuando se somete a ciertas condiciones de temperatura y presión, el TEOS se hidroliza (reacciona con agua) para formar sílice, que puede depositarse como recubrimiento o película delgada en sustratos sólidos, como en la fabricación de circuitos integrados (microchips) y recubrimientos protectores (Alfieri et al., 2019). Debido a su capacidad para formar recubrimientos y películas de sílice uniformes y de alta pureza, el TEOS es ampliamente utilizado en la industria de semiconductores, en la fabricación de pantallas planas (LCD y OLED), en recubrimientos antiadherentes, en materiales cerámicos avanzados y en la fabricación de sensores y dispositivos microelectromecánicos (MEMS).

El proceso de deposición de TEOS es parte integral de la tecnología de deposición química de vapor asistida por plasma (PECVD) y la deposición de capas delgadas por sol-gel. Estas técnicas se utilizan para crear capas funcionales de sílice y otros materiales en sustratos diversos para aplicaciones industriales y tecnológicas (Palma-Barrera et al., 2019).

### 1.6.2 Óxido de galio

El óxido de galio ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) es un compuesto con propiedades únicas que aseguran su versatilidad y utilidad a largo plazo en la industria de los dispositivos semiconductores. Tiene una estructura cristalina monoclinica que le proporciona alta estabilidad y resistencia mecánica (Cruz López, 2021). Aunque generalmente tiene una baja conductividad eléctrica a temperatura ambiente, esta propiedad se puede mejorar mediante un dopaje controlado con algunas impurezas para adaptar sus propiedades eléctricas a diversas aplicaciones de ingeniería. Además, el óxido de galio se distingue por su transparencia óptica en una amplia gama de longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano (Carranza Sánchez, 2020). Esta propiedad lo hace ideal para óptica, celdas solares, sensores infrarrojos y otras aplicaciones que requieren una alta eficiencia de transmisión de luz. Tiene un alto punto de fusión, aproximadamente  $1900\text{ }^\circ\text{C}$ , lo que lo hace adecuado para su uso en entornos de alta temperatura como la electrónica de potencia o aplicaciones aeroespaciales (Rodríguez Baltazar, 2019).

### 1.6.3 Detección de CO<sub>2</sub>

La detección de CO<sub>2</sub> es de suma importancia, debido a los posibles y significativos efectos negativos que puede tener tanto en la salud de las personas, como en el medio ambiente. Altas concentraciones de dióxido de carbono en el ambiente pueden ocasionar diversos síntomas perjudiciales para la salud humana, como mareos, dolores de cabeza, dificultad para respirar e incluso la pérdida total de conocimiento (Guacon Coello, 2023). Es importante tener en cuenta que, si existen niveles excesivos de CO<sub>2</sub> en el aire puede ser indicativo de una inadecuada ventilación en el espacio, lo cual puede proporcionar la propagación de enfermedades respiratorias y afectar drásticamente la calidad del aire que se respira en dicho lugar (Quelal Torres et al., 2024)

Contar con un detector confiable y preciso de CO<sub>2</sub> representa una medida fundamental para prevenir y corregir cualquier situación desfavorable que pueda presentarse, garantizando así un entorno seguro y altamente saludable para todos los individuos que se encuentren en dicho espacio. Al tener la capacidad de detectar y medir los niveles de dióxido de carbono en el aire de manera efectiva, se pueden tomar las acciones preventivas y correctivas necesarias para mantener y mejorar la calidad del aire en ese lugar específico. De esta manera, se asegura un ambiente óptimo para el desarrollo y bienestar de las personas, evitando los riesgos potenciales para la salud asociados con la exposición a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> (Villarreal Obregón, 2023).

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el marco teórico que sustenta la investigación, incluyendo conceptos clave, teorías relevantes y antecedentes de estudios previos que se relacionan con el tema de estudio. Además, se discutirán las bases teóricas que fundamentan la problemática, así como las hipótesis que guían la investigación.

## 2.1 Tetraetilortosilicato

El tetraetilortosilicato o tetraetoxisilano, también conocido como TEOS, es un compuesto químico que pertenece a la familia de los silicatos. Su fórmula química es  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ . Este compuesto es un líquido incoloro a temperatura ambiente. El TEOS es importante en la industria química y en la fabricación de materiales debido a su capacidad para proporcionar silicio en forma de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de alta pureza cuando se descompone térmicamente (Estrucplan, 2000). Diversas industrias químicas hacen uso de este componente químico, ya sea como materia prima directa o incluso como un intermediario crucial en la producción de compuestos de alto valor añadido (Nguyen Thuy et al., 2022).

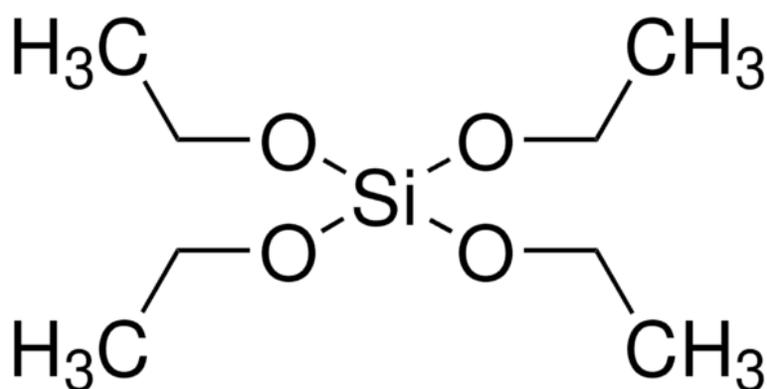


Figura 2.1 Fórmula estructural desarrollada del tetraetilortosilicato. Obtenida de Sigma-Aldrich.  
<https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/aldrich/759414>

### 2.1.1 Origen

Dentro de la categoría de polímeros inorgánicos, se incluyen los derivados del silicio. Los alcoxisilanos, que son precursores de los polisiloxanos, presentan en su estructura molecular enlaces químicos  $\equiv\text{Si}-\text{O}-$  de gran resistencia. Estos enlaces exhiben una energía de enlace significativamente superior a la que se encuentra en los polímeros orgánicos, como las resinas epoxídicas y poliuretánicas, que se caracterizan por enlaces  $-\text{C}-\text{C}-$  (Alfieri et al., 2019).

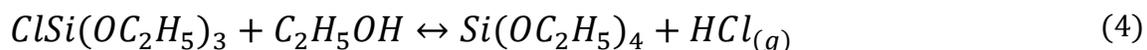
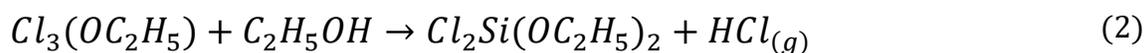
Los silanos poseen la capacidad de establecer enlaces entre materiales tanto orgánicos como inorgánicos. Las interfaces que involucran tales materiales se han convertido en un campo de la química altamente dinámico.

En este campo, las superficies se modifican con el propósito de crear un ambiente heterogéneo deseado o para incorporar las características de distintas fases en una estructura compuesta (Ortiz Gallegos, 2007). Los alcoxisilanos organofuncionales, ya sean de tipo alquilo o arilo, gozan de un amplio y significativo uso en diversas industrias relacionadas con las superficies. Estos compuestos químicos se caracterizan por contener un enlace Si-OR en su estructura.

### 2.1.2 Producción de TEOS

La producción de Tetraetil Ortosilicato (TEOS) se realiza mediante el proceso de esterificación del tetracloruro de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ) con etanol, tal como lo describió Von Ebelman en su informe del siglo XIX. Este proceso comprende dos etapas principales: una etapa de reacción y una etapa posterior de separación y purificación a través de la destilación.

La esterificación del tetraclorosilano con etanol avanza mediante cuatro sucesivas etapas de sustitución nucleofílica biomolecular en el átomo de silicio (Palma-Barrera et al., 2019). La reacción se describe en cuatro pasos



De acuerdo con Palma-Berrera et al., 2018, las ecuaciones de reacción de esterificación, de 1 a 4, del tetracloruro de silicio ( $\text{SiCl}_4$ ) con etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) dan lugar a la producción de tetraetilortosilicato (TEOS). Cada etapa de reacción muestra la sustitución secuencial de los átomos de cloro por grupos etoxi ( $\text{OC}_2\text{H}_5$ ), liberando ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) en cada paso.

### 2.1.3 Reacciones de esterificación

Este fenómeno ocurre cuando un ácido con oxígeno interacciona con un grupo hidroxilo, comúnmente encontrado en alcoholes o fenoles. Los ésteres pueden originarse tanto de ácidos orgánicos como inorgánicos. Una de las esterificaciones más comunes involucra un ácido carboxílico orgánico ( $\text{R-COOH}$ ) y un alcohol ( $\text{R}'\text{-OH}$ ), resultando en la formación de un éster ( $\text{R-COO-R}'$ ) y agua (Molinero Merino, 2013). La producción de TEOS suele involucrar el uso de silicio metalúrgico ( $\text{Si}_{mg}$ ). El  $\text{Si}_{mg}$  se obtiene mediante un proceso de reducción térmica con carbono de la sílice, el cual se lleva a cabo a temperaturas extremadamente elevadas, aproximadamente  $1900\text{ }^\circ\text{C}$ . Como resultado, este proceso conlleva un consumo de electricidad muy elevado (Ortiz Gallegos, 2007).

### 2.1.4 Aplicaciones

En la actualidad, el tetraetilortosilicato ocupa un lugar de gran relevancia en la familia de organosilanos debido a su función como insumo clave en diversas operaciones industriales. Se utiliza principalmente en la fabricación de recubrimientos que ofrecen resistencia química y térmica, así como en la creación de disolventes organosilicio y adhesivos de fundición de precisión (Eurolab, n.d.).

Cuando se somete a una hidrólisis completa, el TEOS se descompone en pequeñas partículas de óxido de silicio, que tienen aplicaciones en la fabricación de polvos fluorescentes. Este proceso es crucial en la producción de materiales luminiscentes utilizados en diversas tecnologías, como las pantallas LED.

Además, el TEOS se emplea en la consolidación de piedras naturales y otros materiales de construcción, formando un gel de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) que mejora la resistencia del sustrato. También se utiliza en la polimerización de resinas de silicona, que encuentran aplicaciones en la fabricación de pinturas y en la modificación de superficies. Este compuesto es esencial en el proceso de sol-gel, que permite la producción de materiales cerámicos y vítreos a partir de precursores líquidos (Arreche et al., 2016). Otra aplicación relevante del TEOS es su capacidad para mejorar el rendimiento de otras resinas y ser utilizado como material base en la creación de compuestos macromoleculares de silicio. El tetraetilortosilicato es un componente valioso en la industria química y de materiales, con una amplia gama de aplicaciones que van desde recubrimientos avanzados hasta la producción de materiales luminiscentes y modificadores de superficies (Estrucplan, 2000).

## 2.2 Óxido de galio

El óxido de galio ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) es un material semiconductor compuesto por 2 átomos de galio y 3 átomos de oxígeno. Estos elementos pertenecen a los grupos III y VI, respectivamente, de la tabla periódica (Zacapantzi Muñoz, 2015). El  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  posee un peso molecular de 187.4 g/mol, una densidad de  $5.88 \text{ g/cm}^3$  y su punto se registra a una temperatura de  $1740 \text{ }^\circ\text{C}$  (Roth, 2024). En la siguiente tabla se pueden observar características principales del óxido de galio (Ver tabla 2.1).

Características principales del óxido de galio	
Índice de refracción	1.97
Estructura del cristal	A= 12.23 Å
	B= 3.04 Å
	C=5.8 Å
	$\beta$ =103.7 Å
Densidad	$5.95 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Punto de fusión	$1725 \text{ }^\circ\text{C}$
Capacidad calorífica	$0.49 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$
Ancho de banda	4.4 – 4.9 eV

Tabla 2.1 Características del Óxido de Galio Obtenida de "Efecto catalizador del óxido de galio en biogás", Cruz López., 2021.

López et al, clasifican al óxido de galio como un óxido transparente conductivo (López et al., 2012), debido a sus propiedades ópticas y eléctricas. Los óxidos transparentes conductivos (TCO) son utilizados como electrodos transparentes en diversos dispositivos optoelectrónicos, además de funcionar como capas de barrera en uniones de túneles y capas activas en sensores de gas, particularmente en sensores de ozono (Hotovy et al., 2010).

## 2.2.1 Propiedades físicas y químicas

El óxido de galio, también conocido como trióxido de galio, es un compuesto químico denominado con fórmula  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Algunas de sus características físicas y químicas se incluyen (Hernández Brenes, 2018).

- Fórmula química:  $\text{Ga}_2\text{O}_3$
- Nomenclatura sistemática: trióxido de galio
- Nomenclatura stock: óxido de galio
- Nomenclatura tradicional: óxido gálico
- Tipo de compuesto: óxido metálico (metal + oxígeno)
- Propiedades físicas: El óxido de galio es un sólido de color blanco plateado.
- Propiedades químicas: El óxido de galio es un compuesto utilizado en la deposición en vacío.

El óxido de galio es un óxido metálico formado por galio y oxígeno. Se han estudiado las propiedades eléctricas de nanoestructuras basadas en óxido de galio, encontrando características utilizables en distintos tipos de aplicaciones (Ágoston et al., 2010).

El dopado de las nanoestructuras de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  permite el control del color de emisión y la formación de morfologías complejas que guían la luz (American Elements, n.d.). La introducción de dopantes como In, Sn y Zn ha permitido estudiar las interacciones que aparecen entre los defectos nativos con las impurezas introducidas (López García, 2014).

## 2.2.2 Fases del óxido de galio

El óxido de galio exhibe cinco fases distintas, diferenciadas con las letras griegas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  y  $\epsilon$ , siendo la fase monoclinica ( $\beta$ ) la más estable entre ellas. Por otro lado, las fases difieren no solo en su grupo de espacio cristalino, sino también en el número de coordinación de iones Ga (Cruz López, 2021). En la siguiente tabla

(Ver Tabla 2.2) se encuentra un resumen de los parámetros de las diferentes fases del óxido de galio:

Fase	Parámetros de red (Å)	Índice de refracción (n)	Constante dieléctrica óptica	Expansión de volumen (1200 K)	Módulo de masa (300 k, GPa)	Descripción
$\alpha$	a=b=4.98-5.04 c=13.4-13.6	1.74-1.95	3.03–3.80	0.035	185	Estructura romboédrica, grupo espacial $R\bar{3}c$ , banda prohibida mayor que todos los demás polimorfos (5.2 eV).
$\beta$	a=12.12-12.34 b=3.03-3.04 c=5.80-5.87	1.68-1.89	2.82–3.57	0.024	150	Estructura monoclinica, grupo espacial $C2/m$ .
$\gamma$	a=8.24-8.30	----	----	----	----	Estructura cúbica, grupo espacial $Fd\bar{3}m$ .
$\delta$	a=9.4-10.0	----	----	0.04	160	Posiblemente bixbyita. Se sugiere que sea una forma nanocristalina de e-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .
$\epsilon$	a= 5.06-5.12 b=8.69-8.79 c= 9.3-9.4	1.6	----	0.028	160	Estructura ortorrómbica, grupo espacial $Pna21$ .

Tabla 1.2 Resumen de las propiedades de los polimorfos de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tabla obtenida de "A review of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials, processing, and devices", Pearton, 2018.

### 2.2.2.1 Fase $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

La fase  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se refiere a la fase cristalina del óxido de galio (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que es un material semiconductor muy utilizado en dispositivos electrónicos. La estructura cristalina de la fase  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se caracteriza por átomos de oxígeno y galio dispuestos en una red cristalina cúbica (Pearton et al., 2018). La estructura cristalina de la fase  $\alpha$  del óxido de galio ( $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se muestra en la Figura 2.2.

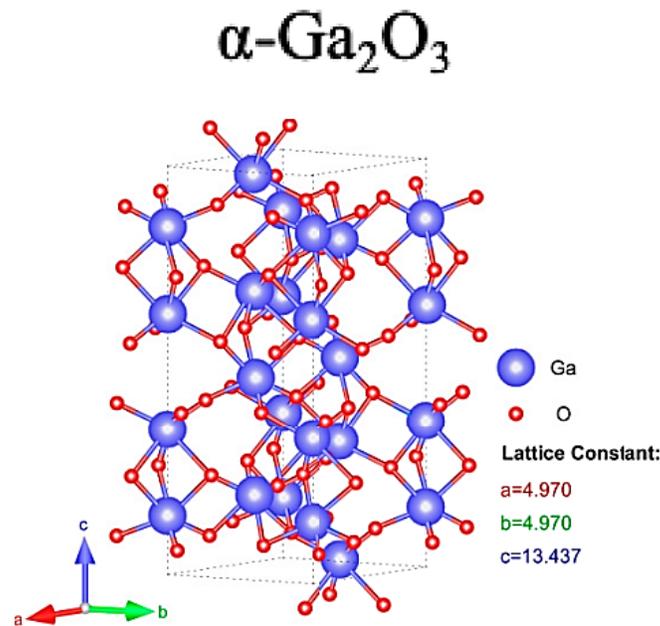


Figura 1.2 Estructura cristalina de la fase  $\alpha$  del óxido de galio ( $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mostrando la disposición atómica y las constantes de la red. Obtenido de "Gallium oxide for gas sensor applications: A comprehensive review", Zhu et al, 2022.

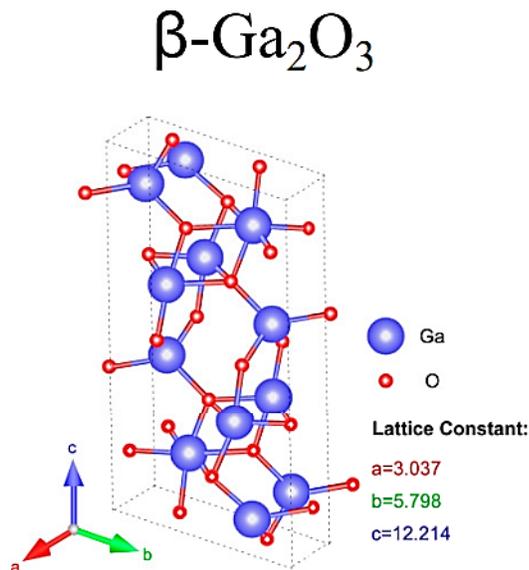
Esta fase tiene propiedades eléctricas y ópticas únicas, que la hacen adecuada para aplicaciones en dispositivos como transistores de potencia, LED y sensores (García Carrión, 2021). Además, la fase  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tiene una banda prohibida amplia, lo que significa que puede soportar altos voltajes eléctricos y temperaturas, lo que la hace ideal para aplicaciones de alta potencia (Nakamura et al., 1994).

- Ancho de banda prohibida: alrededor de 4.9 eV
- Temperatura: estable a temperaturas 1740 °C
- Punto de fusión: alrededor de 1900 °C
- Densidad: alrededor de 6.44 g/cm<sup>3</sup>

- Estado físico: sólido
- Transparencia/opacidad: transparente en el rango visible
- Estructura de los átomos: cubica

### 2.2.2.2 Fase $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

La fase  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es una forma cristalina de óxido de galio (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que tiene una estructura hexagonal. Es conocido por sus propiedades semiconductoras y ha sido estudiado para aplicaciones en dispositivos electrónicos de alta potencia, como transistores y diodos de potencia (Lastra Medina, 2010). La estructura cristalina de la fase  $\beta$  del óxido de galio ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se muestra en la Figura 2.3.



*Figura 2.3 Estructura cristalina de la fase  $\beta$  del óxido de galio ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mostrando la disposición atómica y las constantes de la red. Obtenido de "Gallium oxide for gas sensor applications: A comprehensive review", Zhu et al, 2022.*

Tiene un ancho de banda directo relativamente grande, lo que la hace adecuada para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos como LED y fotodetectores. Además, su alta movilidad de electrones y resistividad intrínseca lo convierten en un material prometedor para aplicaciones en electrónica de potencia (Lan et al., 2006). Sin embargo, la fabricación de dispositivos basados en la fase  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aún enfrenta importantes desafíos, como la obtención de películas delgadas de alta

calidad y la optimización de las propiedades eléctricas del material. Ancho de banda prohibida: alrededor de 4.8 eV

- Temperatura: estable a temperaturas más bajas que la fase  $\alpha$
- Punto de fusión: alrededor de 1800 °C
- Densidad: alrededor de 6.55 g/cm<sup>3</sup>
- Estado físico: sólido
- Transparencia/opacidad: transparente en el rango visible
- Estructura de los átomos: hexagonal

### 2.2.2.3 Fase $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

La fase  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se caracteriza por una estructura cristalina cúbica, con átomos de galio y oxígeno dispuestos de forma ordenada. La estructura cristalina de la fase  $\gamma$  del óxido de galio ( $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se muestra en la Figura 2.4.

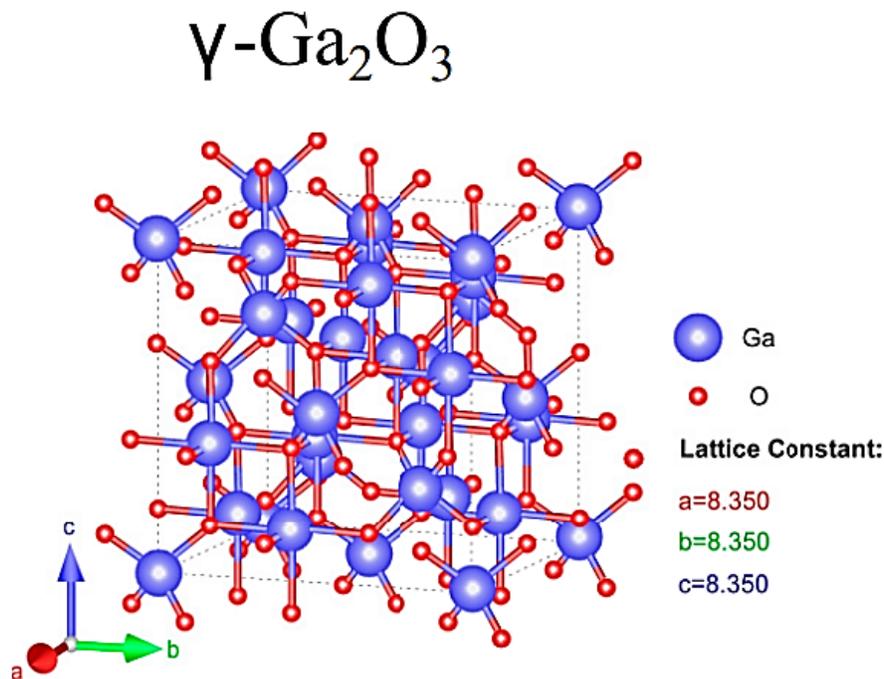


Figura 2.4 Estructura cristalina de la fase  $\gamma$  del óxido de galio ( $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mostrando la disposición atómica y las constantes de la red. Obtenido de "Gallium oxide for gas sensor applications: A comprehensive review", Zhu et al, 2022.

Esta fase tiene interesantes propiedades eléctricas y ópticas, utilizándose en aplicaciones como semiconductores, sensores y dispositivos electrónicos. Además, la fase  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tiene una alta estabilidad térmica y química, lo que la hace adecuada para entornos hostiles (Nakagomi et al., 2017).

Fase  $\gamma$ :

- Ancho de banda prohibida: alrededor de 4.5 eV
- Temperatura: estable a temperaturas más bajas que las fases  $\alpha$  y  $\beta$
- Punto de fusión: alrededor de 1780 °C
- Densidad: alrededor de 6.69 g/cm<sup>3</sup>
- Estado físico: sólido
- Transparencia/opacidad: transparente en el rango visible
- Estructura de los átomos: tetragonal

#### 2.2.2.4 Fase $\delta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

La fase  $\delta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es una de las cinco formas cristalinas del óxido de galio. Se caracteriza por tener una estructura cristalina hexagonal y ser un material semiconductor con propiedades interesantes para aplicaciones en dispositivos electrónicos, optoelectrónicos y sensores.

Presenta una alta movilidad de electrones y una amplia banda prohibida, lo que la hace adecuada para su uso en dispositivos de potencia y radiofrecuencia (Pearton et al., 2018).

Además, su alta resistencia térmica y química la hacen útil en aplicaciones donde se requiere estabilidad a altas temperaturas o ambientes corrosivos (Shi et al., 2022). La estructura cristalina de la fase  $\delta$  del óxido de galio ( $\delta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se muestra en la Figura 2.5.

## $\delta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

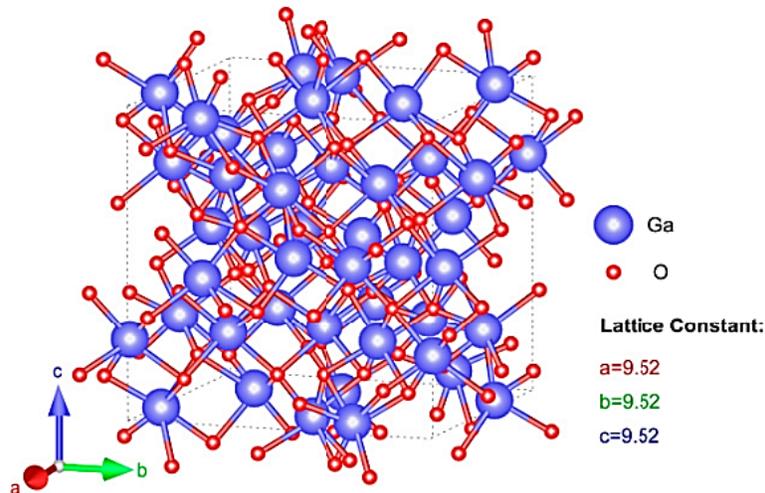


Figura 2.5 Estructura cristalina de la fase  $\delta$  del óxido de galio ( $\delta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mostrando la disposición atómica y las constantes de la red. Obtenido de "Gallium oxide for gas sensor applications: A comprehensive review", Zhu et al, 2022.

Se han realizado investigaciones activas sobre la fase  $\delta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para explorar sus propiedades y posibles aplicaciones en diversos campos tecnológicos.

- Ancho de banda prohibida: alrededor de 4.9 eV
- Temperatura: estable a temperaturas más bajas que las fases  $\alpha$  y  $\beta$
- Punto de fusión: alrededor de 1850 °C
- Densidad: alrededor de 6.44 g/cm<sup>3</sup>
- Estado físico: sólido
- Transparencia/opacidad: transparente en el rango visible
- Estructura de los átomos: hexagonal

### 2.2.2.5 Fase $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

La fase  $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es una forma de óxido de galio que tiene una estructura cristalina cúbica. Se caracteriza por tener propiedades ópticas y eléctricas únicas, lo que la hace interesante para diversas aplicaciones en electrónica y optoelectrónica (Shi et al., 2022).

Se ha demostrado que la fase  $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tiene una alta movilidad de electrones, lo que la convierte en un material prometedor para dispositivos electrónicos de alta potencia, como transistores de campo o diodos emisores de luz (LEDs). Además, su amplia banda prohibida la hace adecuada para aplicaciones en las que se requiere un alto rendimiento energético. La estructura cristalina de la fase  $\epsilon$  del óxido de galio ( $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se muestra en la Figura 2.6.

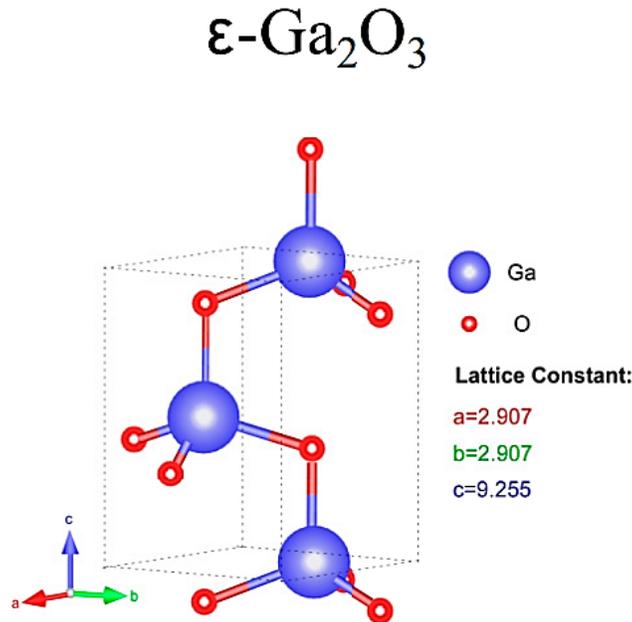


Figura 2.6 Estructura cristalina de la fase  $\epsilon$  del óxido de galio ( $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mostrando la disposición atómica y las constantes de la red. Obtenido de "Gallium oxide for gas sensor applications: A comprehensive review", Zhu et al., 2022.

La investigación sobre la fase  $\epsilon$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> está en curso y se espera que siga creciendo en los próximos años a medida que se exploran nuevas formas de utilizar este material en dispositivos electrónicos avanzados.

### 2.2.3 Aplicaciones

El óxido de galio (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ha sido extensamente estudiado y aplicado en diversos campos tecnológicos debido a sus propiedades únicas y versatilidad. Este compuesto encuentra aplicaciones importantes en la fabricación de láseres, fósforos y materiales luminiscentes, así como en barreras aislantes en uniones

estrechas. Además, su uso como óxido conductor transparente (TCO) es particularmente relevante en la industria electrónica, especialmente cuando está dopado con elementos como el indio o el estaño. En este contexto, el  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  dopado se utiliza en dispositivos como pantallas de cristal líquido (LCDs) y paneles solares, donde su alta transparencia y conductividad mejoran el rendimiento y la eficiencia de estos dispositivos (Szyszka et al., 2012).

Una de las fases más estudiadas del óxido de galio es la monoclinica  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , que se destaca en la fabricación de sensores de gas debido a su alta sensibilidad y estabilidad química. Estos sensores son capaces de detectar gases con alta precisión, lo que los hace ideales para aplicaciones en entornos industriales y ambientales donde la detección precisa de gases es crucial.

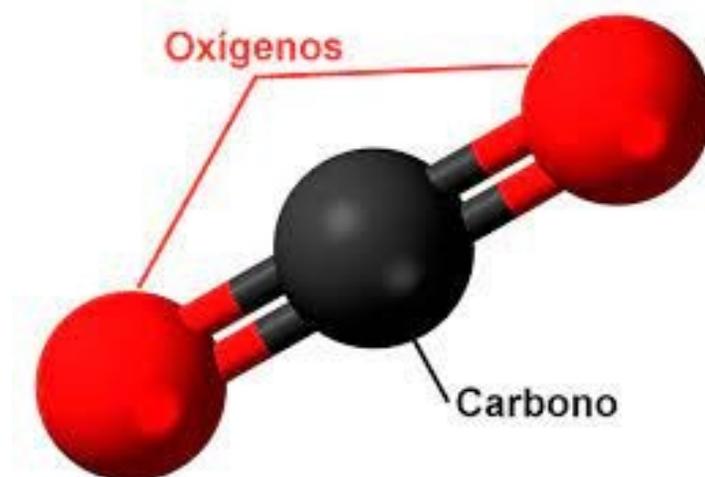
En la industria de la energía solar, el  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  también juega un papel vital. Se utiliza en revestimientos dieléctricos para células solares, mejorando la eficiencia energética de estas al reducir la pérdida de energía y aumentar la absorción de luz. Este uso es especialmente importante en el desarrollo de células solares de próxima generación, donde cada mejora en eficiencia puede tener un impacto significativo en la producción de energía renovable.

Otra aplicación emergente y prometedora del  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  es en el campo de los transistores de potencia. Gracias a su alta movilidad de electrones y baja resistencia, el  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  se está investigando como material para transistores de alta eficiencia que podrían reemplazar a los transistores de silicio en ciertos contextos, ofreciendo un mejor rendimiento y menor consumo de energía. El ámbito de los fotodetectores UV, las películas delgadas de  $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$  sobre sustratos de zafiro han mostrado una respuesta muy sensible y rápida a la radiación ultravioleta. Esta propiedad las hace ideales para aplicaciones en detección de UV, incluyendo seguridad, monitoreo ambiental y comunicaciones (Szyszka et al., 2012).

## 2.3 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un gas crucial en el efecto invernadero, responsable de retener el calor en la atmósfera. Este gas se genera principalmente a partir de la extracción y combustión de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, así como de fenómenos naturales como los incendios forestales y las erupciones volcánicas.

Desde el inicio de la era industrial en el siglo XVIII, las actividades humanas han incrementado el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico en un 50 %, lo que implica que la cantidad actual de  $\text{CO}_2$  es un 150 % mayor que en 1750 (NASA, 2024). La estructura molecular del  $\text{CO}_2$  se muestra a continuación en la Figura 2.3



*Figura 2.2 La estructura de la molécula de  $\text{CO}_2$  Obtenida de Geological Man Blog.  
<https://geologicalmanblog.wordpress.com/2016/04/26/co2/>*

### 2.3.1 Propiedades químicas y físicas

En condiciones ambientales, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un gas inodoro e incoloro que está formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno unidos por enlaces covalentes (Carburos metálicos, 2019). Dicho compuesto se genera durante los procesos de fermentación, respiración y combustión, por mencionar algunas actividades más relevantes (Arroyo et al., 2020).

En la Tabla 2.3 se mencionan algunas propiedades del CO<sub>2</sub>.

Propiedades físicas del CO <sub>2</sub>	
Formula química	CO <sub>2</sub>
Peso molecular	44.011 g/mol
Temperatura de sublimación (1atm)	-78.4 °C
Temperatura punto triple	-56.57°C
Temperatura crítica	31 °C
Presión crítica	73.82 bar
Presión punto triple	5.18 bar
Densidad gas (15 °C, 1 atm)	1.848 g/l

*Tabla 2.2 Propiedades físicas del CO<sub>2</sub>. Obtenido de "Ficha de datos de seguridad: Óxido de galio (III) min. 99,99 %, p.a.", Roth, 2024.*

### 2.3.2 Efectos del dióxido de carbono en el medio ambiente

Un aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera tiene diversos efectos sobre el medio ambiente como gas de efecto invernadero, el CO<sub>2</sub> provoca el calentamiento global y el cambio climático. A medida que se acumulan en la atmósfera, aumentan significativamente la temperatura promedio de la Tierra, provocando fenómenos climáticos extremos como sequías más prolongadas, inundaciones más devastadoras y tormentas más intensas y frecuentes. Además, el exceso de CO<sub>2</sub> también se disuelve en los océanos, provocando una rápida acidificación del agua de mar y afectando negativamente a diversos ecosistemas marinos y su frágil biodiversidad (Gutierrez et al., 2024).

La contaminación de la atmósfera terrestre mediante CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) es uno de los retos globales más importantes que enfrenta el planeta, ya que es una de las principales causas del efecto invernadero y del cambio climático. Tradicionalmente, la industrialización y el desarrollo han sido sinónimos de contaminación, con países como China, Estados Unidos, India, Rusia, Alemania y

Japón liderando la emisión de CO<sub>2</sub> (Ver Figura 2.4) debido a sus economías industriales (Gil, 2019).

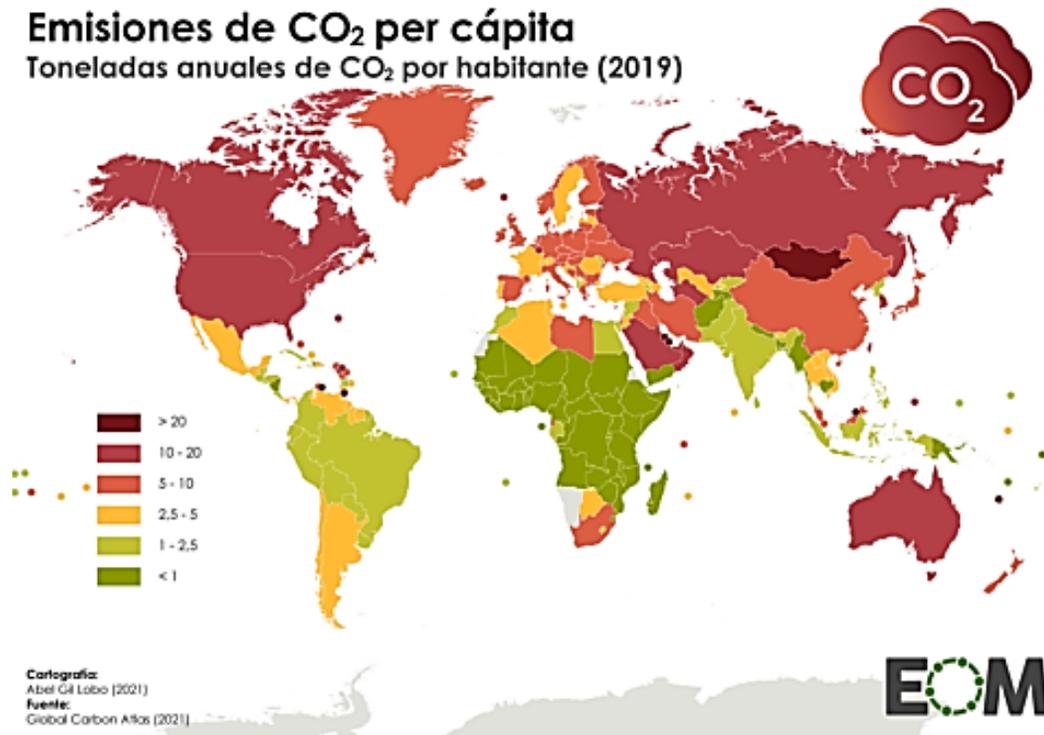


Figura 2.3 Los países que más CO<sub>2</sub> generan del mundo. Obtenida de “En El Orden Mundial”, <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/los-paises-que-mas-co2-generan-del-mundo/>

Esta acidificación causa estragos en la vida marina, como los corales y las conchas de mejillones, poniendo en peligro su supervivencia y afectando gravemente a la cadena alimentaria marina. Por si fuera poco, el dióxido de carbono también puede provocar graves desequilibrios en los ecosistemas terrestres (Molina et al., 2024).

Las crecientes concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera pueden cambiar los patrones de vegetación, haciendo que algunas especies de plantas prosperen mientras que otras se ven gravemente afectadas (Hernández, 2019). Esto afecta a la gran cantidad de animales que dependen de estas plantas para alimentarse y refugiarse, lo que lleva a una reducción de la biodiversidad y la riqueza de especies. Además, el CO<sub>2</sub> puede incluso afectar la capacidad del suelo para almacenar

nutrientes esenciales para las plantas, aumentando aún más el impacto en los ecosistemas terrestres (Espinoza Ramos, 2003).

Un aumento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera tiene muchos efectos negativos en el medio ambiente. Desde el aumento del calentamiento global y los fenómenos meteorológicos extremos hasta la acidificación de los océanos y los desequilibrios en los ecosistemas terrestres, es importante tomar medidas urgentes para reducir las emisiones de carbono y los impactos negativos en nuestro planeta. El despliegue de energía renovable, la protección de los ecosistemas naturales y la promoción de prácticas sostenibles son esenciales para garantizar un futuro sostenible para las generaciones futuras. Sólo a través de una acción colectiva y comprometida podremos enfrentar y resolver este desafío global (Jiménez-Torres, 2021). En la siguiente grafica (ver Figura 2.5) se puede observar las mediciones de CO<sub>2</sub> en los últimos años.

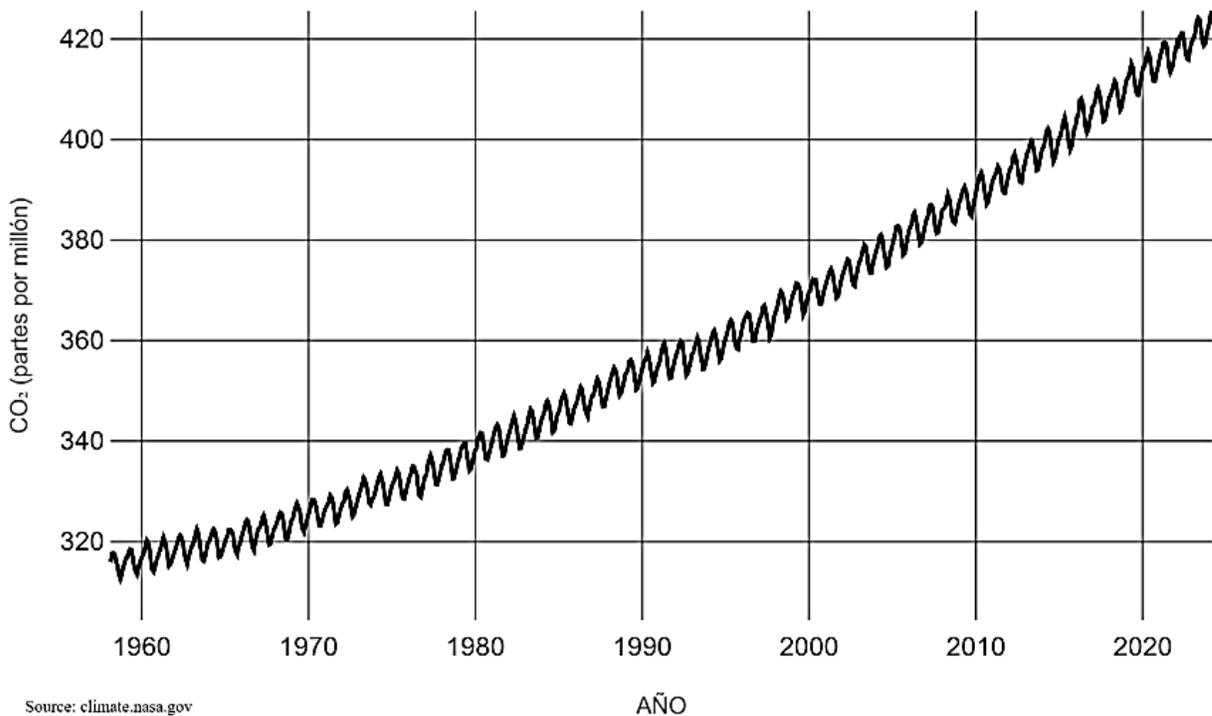


Figura 2.4 Mediciones de CO<sub>2</sub> (partes por millón) en los últimos años. Obtenido de “Dióxido de Carbono” <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>

## 2.4 Tecnologías de detección de CO<sub>2</sub>

Las tecnologías de detección de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) han evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsadas por la necesidad de monitorear y controlar las concentraciones de CO<sub>2</sub> en diversas aplicaciones industriales y ambientales (Ramírez González, 2011). Estos avances tecnológicos han permitido el desarrollo de sensores más precisos y eficientes, capaces de detectar niveles de CO<sub>2</sub> con mayor sensibilidad y en tiempo real. Entre las tecnologías más comunes se encuentran los sensores basados en principios ópticos y electroquímicos, principalmente. Los sensores ópticos, por ejemplo, utilizan la absorción infrarroja para medir la concentración de CO<sub>2</sub>, lo que los hace altamente precisos para una amplia gama de aplicaciones, desde la calidad del aire interior hasta el monitoreo ambiental en exteriores (Manuel Alejandro et al., 2023). La elección de la tecnología de detección adecuada depende de varios factores, incluyendo la precisión requerida, el entorno de operación y el costo.

### 2.4.1 Tipo de sensores de CO<sub>2</sub>

Existen varios tipos de sensores de CO<sub>2</sub>, cada uno con sus propias características y aplicaciones dependiendo de la tecnología utilizada para la detección del gas (Navas-Cendúa et al., 2022).

1. **Sensores Electroquímicos:** Estos sensores miden la concentración de CO<sub>2</sub> a través de la oxidación o reducción del gas en un electrodo, generando un flujo de corriente eléctrica. Son ampliamente utilizados debido a su alta precisión y capacidad para detectar concentraciones bajas de gases.
2. **Sensores de Piezoeléctrico:** Los sensores de efecto piezoeléctrico, como los que utilizan cristales de cuarzo, son dispositivos que aprovechan el fenómeno piezoeléctrico para medir y detectar variaciones físicas a través de señales eléctricas. El cuarzo, un material con propiedades piezoeléctricas, es capaz de generar una corriente eléctrica cuando se le aplica una presión mecánica, y viceversa, de deformarse cuando se le aplica un campo eléctrico (Ramírez González, 2011).

3. **Sensores de Infrarrojos (NDIR):** Estos sensores detectan la concentración de CO<sub>2</sub> mediante la absorción de radiación infrarroja en longitudes de onda específicas. Son muy populares debido a su alta precisión, estabilidad a largo plazo y baja necesidad de calibración. Además, no se ven afectados por la humedad o la contaminación.
4. **Sensores de Fotoionización:** Utilizan luz ultravioleta para ionizar las moléculas de CO<sub>2</sub> y detectar la cantidad de gas presente. Son particularmente útiles para detectar niveles bajos de gases en entornos donde otras tecnologías pueden fallar, aunque suelen ser más costosos.

## 2.4.2 Aplicaciones actuales y avances tecnológicos en la detección de CO<sub>2</sub>

La detección de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ha ganado importancia en diversas aplicaciones industriales y ambientales, particularmente debido al aumento de las preocupaciones sobre el cambio climático y la calidad del aire. Los sensores de CO<sub>2</sub> son cruciales para la monitorización ambiental, la automatización de edificios y la industria, permitiendo el control de procesos y la gestión energética.

### 2.4.2.1 Sensores basados en semiconductores y materiales avanzados

Los avances recientes se han enfocado en mejorar la selectividad, sensibilidad y respuesta de los sensores de CO<sub>2</sub>. Los semiconductores, en combinación con materiales avanzados como el óxido de galio (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), han mostrado un gran potencial en la detección de CO<sub>2</sub>. Estos materiales permiten una mayor estabilidad térmica y una mejor respuesta en presencia de gases interferentes. La incorporación de estos sensores en dispositivos IoT (Internet de las Cosas) es un campo de investigación activa, lo que facilita su integración en sistemas de monitorización ambiental y de edificios inteligentes (Manuel Alejandro et al., 2023).

## CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se detallan los procedimientos experimentales utilizados en la investigación, incluyendo la preparación de las muestras, las técnicas de caracterización empleadas y los métodos de análisis de datos. Se describen los materiales y equipos utilizados, así como los pasos seguidos para llevar a cabo los experimentos de manera rigurosa.

## 3.1 Preparación del TEOS

El método de preparación detallado a continuación describe el proceso utilizado para sintetizar un material específico a partir de una solución de reacción. En este proceso, se emplean varios materiales y sustancias, cada uno desempeñando un papel crucial en la síntesis y caracterización del producto final.

El medio de reacción se compone principalmente de etanol, utilizado como disolvente, y tetraetilortosilicato (TEOS), que actúa como precursor del material objetivo. Además, se agrega agua desionizada y ácido clorhídrico (HCl) para facilitar la hidrólisis controlada del TEOS.

### 3.1.1 Materiales y reactivos:

- Etanol (3.28 ml)
- Tetraetilortosilicato (TEOS, Sigma Aldrich, grado reactivo, 98%) (3.3 ml)
- Agua desionizada (0.53 ml)
- Ácido clorhídrico (HCl, Fermont, 37.6%) (0.0001 ml)
- Vaso precipitado de 40 ml (preferentemente)
- Parrilla con agitación magnética de laboratorio
- Agitador magnético
- Portaobjetos de vidrio

### 3.1.2 Método de preparación

A continuación, se describe el método realizado para la preparación del TEOS.

1. Se vierten 3.28 ml de etanol en un vaso precipitado de 40 ml.
2. El vaso se coloca sobre una parrilla con agitación magnética, y se mantiene en agitación para asegurar la homogeneidad de la mezcla durante la reacción.
3. Se añaden 3.3 ml de tetraetilortosilicato (TEOS) al etanol.

4. La mezcla se agita a 650 revoluciones por minuto (rpm) durante 20 minutos para permitir la dispersión homogénea de TEOS en el medio de reacción.
3. Se agregan 0.53 ml de agua desionizada en la mezcla, seguido de la adición precisa de 0.0001 ml de ácido clorhídrico (HCl).
4. La solución resultante se somete a agitación continua a 650 rpm durante 45 minutos, permitiendo así la hidrólisis controlada de TEOS (Ver Figura 3.1).
5. La solución se deposita sobre el portaobjetos por goteo, permitiendo que la solución se escurra sobre el portaobjetos, asegurándose de cubrir completamente la superficie.
6. Finalmente, el depósito se deja secar durante 1 minuto. Para la formación de capas adicionales, el proceso del paso 5 se repite según sea necesario, dependiendo de las capas requeridas en la estructura final (Ver Figura 3.2).



*Figura 3.1 Solución sometida a agitación continua a 650 rpm*



*Figura 3.2 Deposito de la solución en un portaobjeto para la formación de las respectivas capas*

## 3.2 Síntesis de óxido de galio

El óxido de galio se obtuvo mediante la conversión térmica de obleas cristalinas de arseniuro de galio. El método de obtención involucró la limpieza de las obleas de GaAs para eliminar la oxidación no deseada e impurezas de la superficie, antes de realizar el proceso de conversión.

### 3.2.1 Materiales y reactivos:

- Obleas de GaAs (111) dopadas con Te
- Agua desionizada
- Ácido clorhídrico (HCl, Fermont, 37.6%) (0.0001 ml)
- Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Fermont, 97 %)
- Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fermont, 30 %)
- Metanol (Meyer)
- Acetona (Fermont, 99.7 %)
- Vaso precipitado de 40 ml (preferentemente)
- Baño ultrasónico
- Horno horizontal
- Mortero
- Agitador magnético

### 3.2.2 Método de preparación

A continuación, se describe el método de limpieza:

#### 1. Desengrasado (Ver Figura 3.3):

- La oblea se sumergió en acetona en baño ultrasónico durante 5 minutos.
- La oblea se sumergió en metanol en baño ultrasónico durante 5 minutos.
- La oblea se enjuagó con agua desionizada en baño ultrasónico durante 5 minutos.

## 2. Eliminación de óxido:

- La oblea se sumergió en una mezcla de  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (5:1:1) en baño ultrasónico durante 10 segundos a temperatura ambiente, asegurándose de mezclar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}$  antes de agregar  $\text{H}_2\text{O}_2$  para controlar la reacción exotérmica.
- La oblea se enjuagó con agua desionizada en baño ultrasónico durante 5 minutos.

## 3. Oxidación fina:

- La oblea se sumergió en una mezcla de  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$  (1:1) en baño ultrasónico durante 10 segundos a temperatura ambiente (Ver Figura 3.4).
- La oblea se enjuagó con agua desionizada en baño ultrasónico durante 5 minutos.
- Finalmente, la oblea se sumergió en acetona en baño ultrasónico durante 5 minutos.

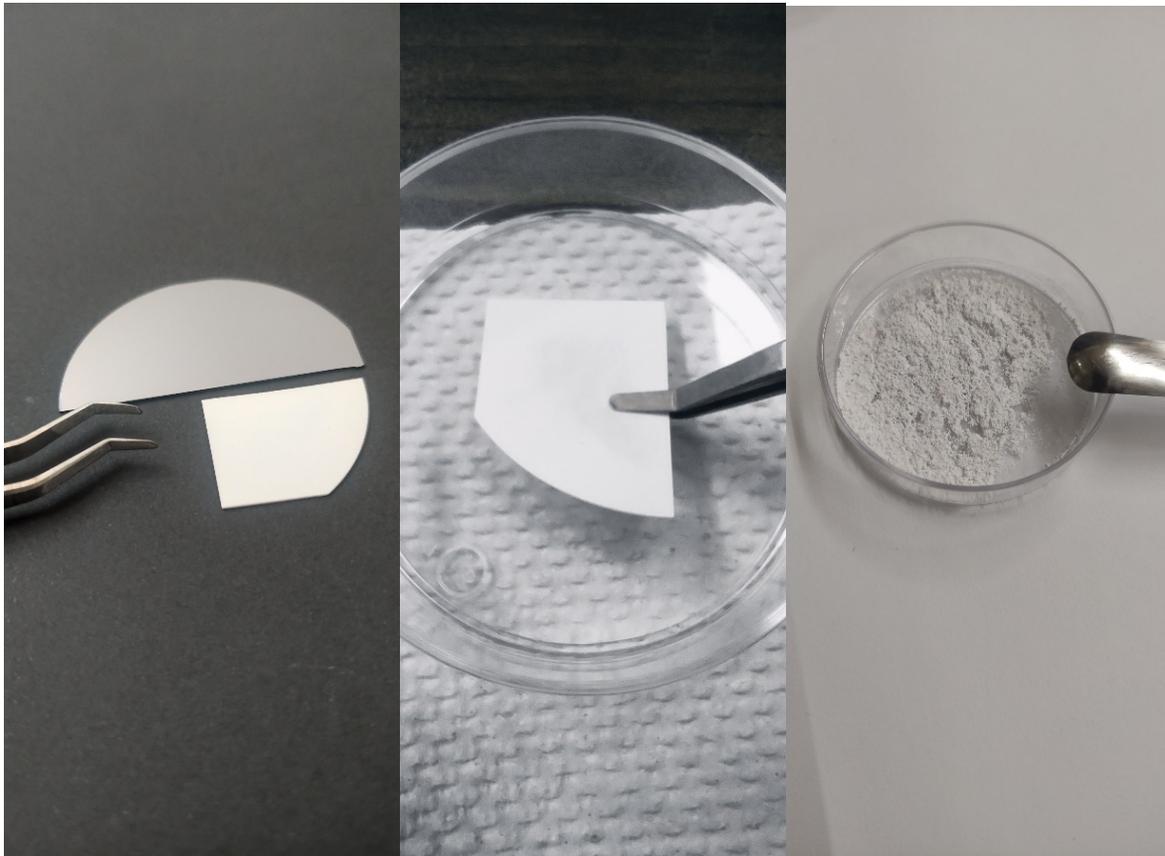


Figura 3.3 Oblea sumergida en acetona, metanol y agua desionizada respectivamente



Figura 3.4 Limpieza del sustrato en el baño ultrasónico

Por otro lado, el proceso de conversión involucra la desorción térmica del arsénico, contenido en la oblea de GaAs, empleando rampas de temperatura, a partir de las obleas de GaAs limpias. Las rampas tienen el proceso de precalentamiento, el recocido, el calentamiento, la oxidación y el enfriamiento para lograr la sublimación completa del arseniuro de galio (As) y la formación de enlaces estables de  $Ga_2O_3$ . En la Figura 3.5 se muestra el proceso de conversión de las obleas de GaAs.



*Figura 3.5 Proceso de conversión de obleas de GaAs. Las imágenes muestran (de izquierda a derecha) una oblea de GaAs limpia, una oblea en proceso de desorción térmica de arsénico y la formación de  $Ga_2O_3$  tras la sublimación del arsénico. Este proceso incluye etapas de precalentamiento, recocido, calentamiento, oxidación y enfriamiento para lograr la formación de enlaces estables de  $Ga_2O_3$ .*

Los tiempos y temperaturas del proceso de conversión se muestran en la Figura 3.5.

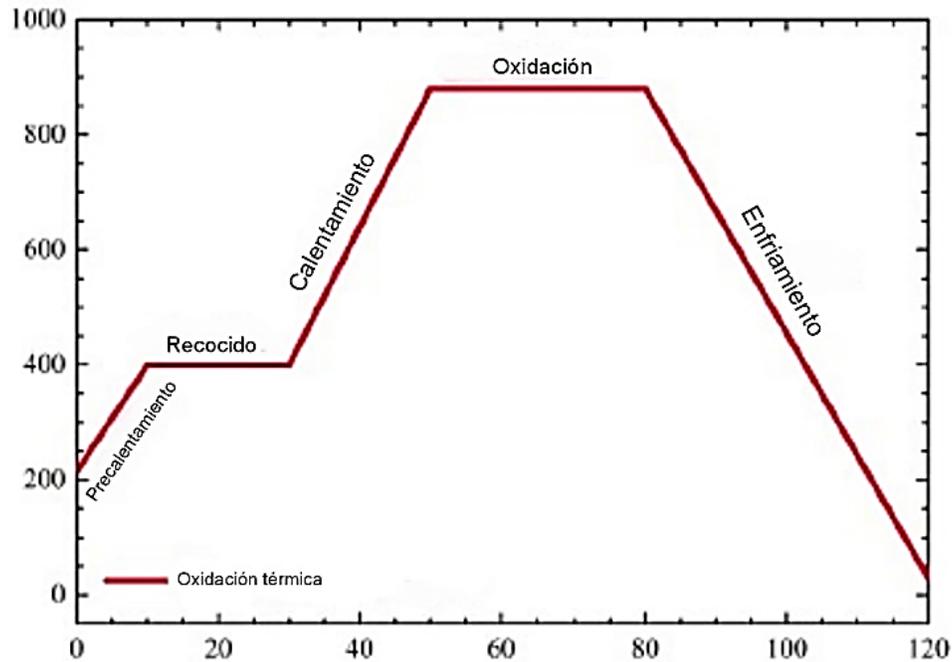


Figura 3.6 Rampa de temperatura de la síntesis de materiales a partir de la oxidación térmica de obleas de GaAs. Obtenido de "Study and characterization of the nanotextured  $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-GaOOH}$  formations synthesized via thermal oxidation of GaAs in ambient air", Solís-Cisnero et al, 2023.

La rampa de calentamiento persigue diferentes objetivos, lo cuales son:

- Precalentamiento (200 °C). Preparar las obleas para el recocido, asegurando un calentamiento homogéneo durante la etapa de calentamiento.
- Recocido (400 °C). Garantizar un calentamiento uniforme para reducir la formación de grietas al segregar el As hacia la superficie.
- Calentamiento (400 – 900 °C). Se busca la sublimación completa del As al alcanzar una temperatura de 900 °C, la cual inicia a partir de los 580 °C.
- Oxidación (900 °C). Permitir que el oxígeno reaccione con el Ga cerca de la superficie, formando enlaces estables de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ .
- Enfriamiento (900 °C – temperatura ambiente). Permitir que las obleas se enfríen a temperatura ambiente después del proceso de oxidación.

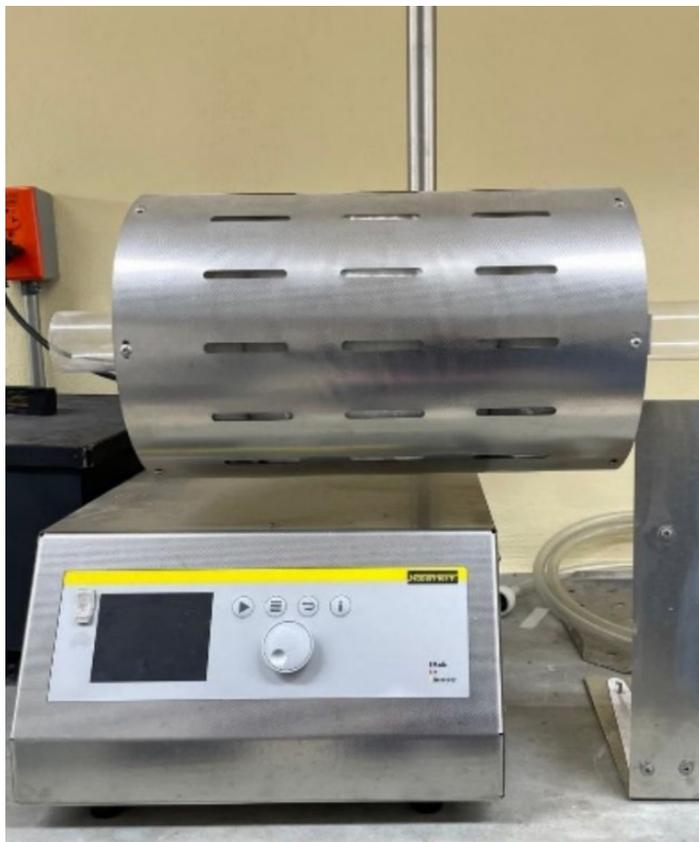


Figura 3.7 Horno tubular compacto



Figura 3.8 El proceso incluye las etapas de precalentamiento, recocido, calentamiento

El material obtenido se molió con un mortero hasta obtener un polvo, el polvo se procesó mediante el mismo tratamiento térmico por segunda vez. Posteriormente, el polvo se dispersó en 30 ml de alcohol etílico agitando a 400 rpm durante 10 min para obtener una suspensión coloidal de óxido de galio; Se realizaron cuatro concentraciones coloidales que se presentan en la Tabla 3.1.

Coloide	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mg)	Etanol (ml)
C1	0.1	30
C2	0.2	30
C3	0.3	30
C4	0.4	30

Tabla 3.1 Concentración de suspensiones coloidales de óxido de galio.

### 3.3 Síntesis de TEOS modificado con óxido de galio

La solución de TEOS se modificó cambiando el EtOH, del paso 2, en el método de preparación 3.1.2, por la suspensión coloidal. Se realizaron cuatro preparaciones, cada una con una suspensión coloidal diferente (C1, C2, C3 y C4). Las muestras de TEOS modificado se fabricaron dejando caer la preparación sobre sustratos de vidrio, formando 1, 2, 3 y 4 capas. Las muestras se etiquetaron con la letra M seguida de dos números, el primer número corresponde a la suspensión coloidal de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (C1, C2, C3 o C4) y el segundo número corresponde al número de capas depositadas (1, 2, 3 o 4). Luego, por ejemplo, se preparó la muestra M33 usando la suspensión coloidal C3 con tres capas.

#### 3.3.1 Materiales y reactivos

- Suspensión coloidal (3.28 ml)
- Tetraetilortosilicato (TEOS, Sigma Aldrich, grado reactivo, 98%) (3.3 ml)
- Agua desionizada (0.53 ml)
- Ácido clorhídrico (HCl, Fermont, 37.6%) (0.0001 ml)
- Vaso precipitado de 40 ml (preferentemente)
- Parrilla con agitación magnética de laboratorio
- Agitador magnético
- Portaobjetos de vidrio

#### 3.3.2 Método de preparación

El método realizado para la preparación del TEOS modificado con la solución coloidal de óxido de galio se describe a continuación:

1. Medir 3.28 ml de la solución coloidal y verterlos en un vaso precipitado de 40 ml (Ver Figura 3.8).
2. Colocar el vaso sobre una placa calefactora para mantener el etanol a una temperatura controlada.

3. Añadir un agitador magnético al vaso y comenzar la agitación a 600 RPM, para asegurar la homogeneidad de la mezcla durante todo el proceso de reacción.
4. Añadir lentamente 3.3 ml de TEOS al vaso que contiene la solución coloidal.
5. Agitar la a 650 rpm durante 20 minutos para permitir una dispersión homogénea del TEOS y la suspensión coloidal en el medio de reacción (Ver Figura 3.9).



*Figura 3.9 Se añade la sustancia coloidal*



*Figura 3.10 Se deja agitando durante 20 minutos a 650 rpm para permitir la dispersión homogénea*

### 3.3.3 Fabricación de las muestras

Las muestras fueron fabricadas mediante el depósito de las soluciones (TEOS y TEOS modificado) sobre portaobjetos de vidrio por goteo, permitiendo que la solución se escurra sobre el portaobjetos, asegurándose de cubrir completamente la superficie. Se emplearon 3 gotas para formar una capa, la solución depositada se deja secar durante 1 minuto. Para la formación de capas adicionales, se repite el proceso según el número de capas requeridas.

### 3.4 Sensor resistivo

Para determinar la posible aplicación del TEOS modificado en la detección de CO<sub>2</sub> se fabricó un dispositivo sensor del tipo resistivo. El sensor se fabricó con las condiciones de la muestra M33, ya que como se presenta en el capítulo 4, se considera que presenta las condiciones necesarias para la aplicación. Se colocaron puntos de tinta conductiva de cobre, marca Steren, sobre la superficie de la muestra, en estos puntos se colocaron caimanes con cables, como se muestra en el circuito eléctrico de la Figura 3.11. Se aplicó un voltaje de 5 V en DC, empleando una fuente marca Protek, modelo PL-3003S; la corriente eléctrica se midió con un amperímetro, conectado en serie, marca Keithley, modelo 2000.

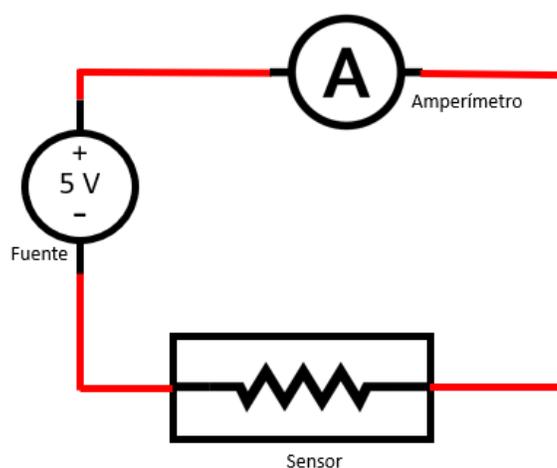
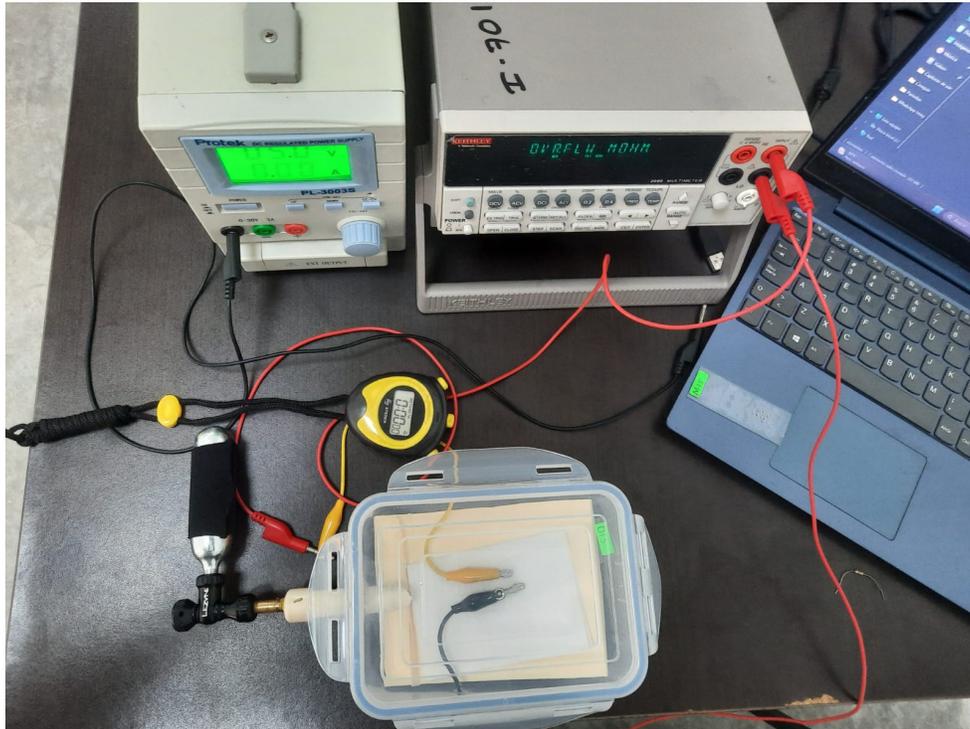


Figura 3.11 Esquema de la conexión para medir corriente eléctrica del sensor resistivo

El dispositivo fabricado se expuso a  $\text{CO}_2$  empleando una cámara de plástico, de fabricación casera, en condiciones ambientales (temperatura  $\sim 29^\circ\text{C}$  y humedad  $\sim 58\%$ ). El ambiente de la cámara no se limpió con ningún gas, ni se evacuó el ambiente. El  $\text{CO}_2$  se inyectó en la cámara en paralelo a la superficie del sensor. No se controló la masa inyectada debido a que solo se requería hacer una prueba para determinar la viabilidad del material en la detección de  $\text{CO}_2$ . Para la detección del gas, se hicieron 3 exposiciones, esperando 5 minutos entre ellas para observar la recuperación del sensor. La cámara de sensado se abrió al ambiente, durante el periodo de recuperación del sensor para permitir la desorción del  $\text{CO}_2$ . En la Figura 3.12 se presenta una fotografía del sistema empleado para medir la respuesta del sensor.



*Figura 3.12 Sistema de la fuente, amperímetro y sensor conectados en serie*

### 3.3.4 Caracterización de materiales

### 3.3.5 Caracterización estructural

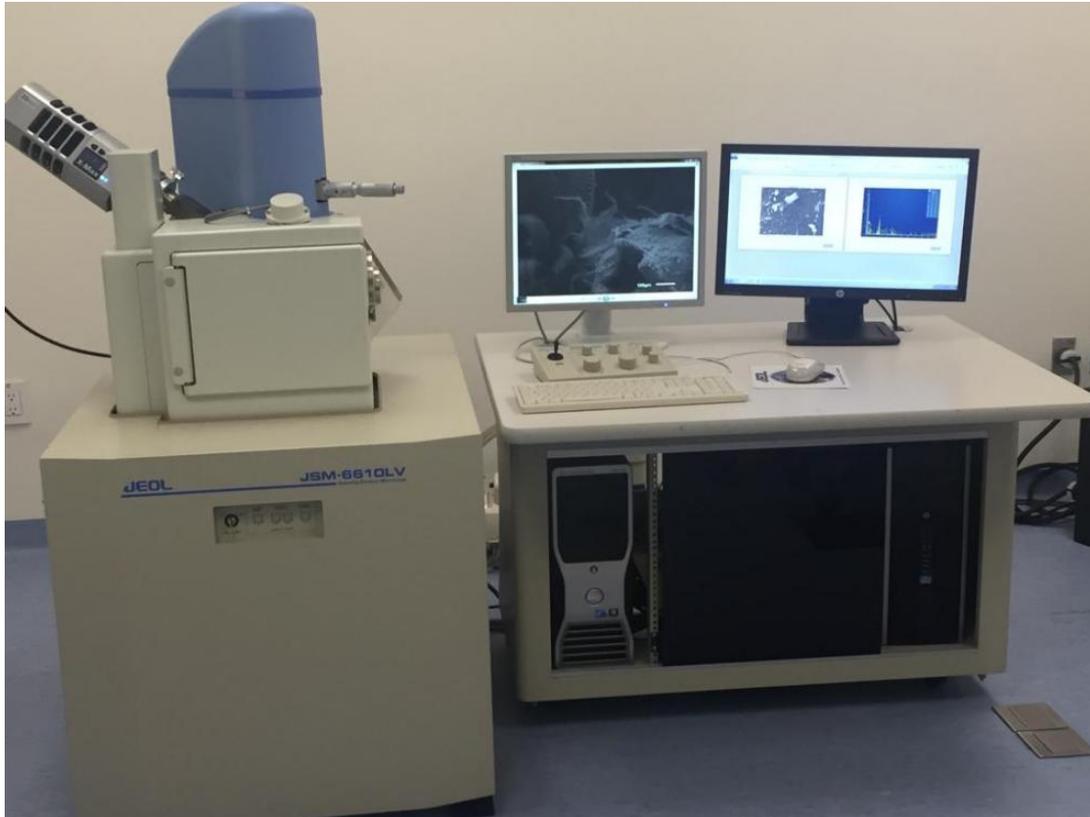
La estructura de las muestras se estudió mediante mediciones de rayos X, para lo cual se utilizó un difractómetro marca RIGAKU, modelo ULTIMA IV. La identificación de los picos de difracción de rayos X (DRX) se realizó con el software de difracción de polvo de rayos X Rigaku PDXL. En la Figura 3.9 se presenta una fotografía del equipo usado, instalado en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la UNICACH.



*Figura 3.9 Difractómetro de Rayos X*

### 3.3.6 Caracterización morfológica

La caracterización morfológica y la distribución química elemental se estudiaron mediante un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JSM 6010LA equipado con un analizador EDS (rayos X de dispersión de energía) integrado.



*Figura 3.10 Microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JSM6010LA, Obtenido de "Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) JEOL-6610LV", <https://itrans.cucei.udg.mx/catalogo-de-equipos/microscopio-electronico-de-barrido-meb-jeol-6610lv>.*

### 3.3.7 Caracterización composicional

La caracterización composicional de las muestras se llevó a cabo mediante mediciones de espectroscopía Raman, utilizando un espectrómetro marca Horiba modelo LabRam HR Evolution, con una fuente de excitación con una longitud de onda de 632 nm. La identificación de los modos vibracionales y su análisis se efectuaron con el software de espectroscopía Raman asociado al equipo.



*Figura 3.11 Espectrómetro marca Horiba modelo LabRam HR Evolution, Obtenido de "Hochauflösende Raman-Spektroskopie mit dem LabRAM-HR Evolution", <https://analyticalscience.wiley.com/content/news-do/hochaufl%C3%B6sende-raman-spektroskopie-mit-dem-labram-hr-evolution>.*

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados y se discuten en relación con los objetivos de la investigación y el marco teórico. Se incluyen gráficos, tablas y figuras que ilustran los hallazgos principales, así como un análisis crítico de los mismos, comparándolos con estudios previos y destacando su relevancia.

## 4.1 Caracterización estructural

Los patrones DRX de las muestras se presentan en las figuras 4.1a y 4.1b. El patrón DRX del polvo de óxido de galio, utilizado en las suspensiones coloidales para modificar el TEOS, se presenta en la parte inferior de ambas figuras, etiquetado como P (para hacer referencia al polvo). Se observa que el polvo tiene una mezcla de fases de estructura monoclinica preferencial ( $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) y trazas de la estructura ortorrómbica ( $\text{GaOOH}$ ) identificados con las tarjetas PDF 00-043-1012 y 00-006-0180, respectivamente. El patrón etiquetado como R corresponde a una muestra de referencia, la cual fue fabricada utilizando la solución TEOS sin modificación; se observa que esta muestra es amorfa debido a la anchura del hombro mostrado, sin que se identifique ningún pico DRX. La intensidad de los picos de DRX de las muestras fabricadas con C1 y C2 de TEOS modificado eran demasiado débiles para poder determinarse. Los patrones DRX de las muestras fabricadas con C3 (Figura 4.1A) y C4 (Figura 4.1B) presentan los planos cristalinos de  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (400), (002), (111) y (-221) a  $30.06^\circ$ ,  $31.7^\circ$ ,  $35.18^\circ$  y  $64.48^\circ$  y el plano (100) de  $\alpha$ - $\text{GaOOH}$  a  $21.5^\circ$ ; la presencia de estos picos, montados sobre el patrón de TEOS sin modificar, indica que el TEOS se modificó con éxito. Se observa que la intensidad de los picos aumenta con el número de capas depositadas.

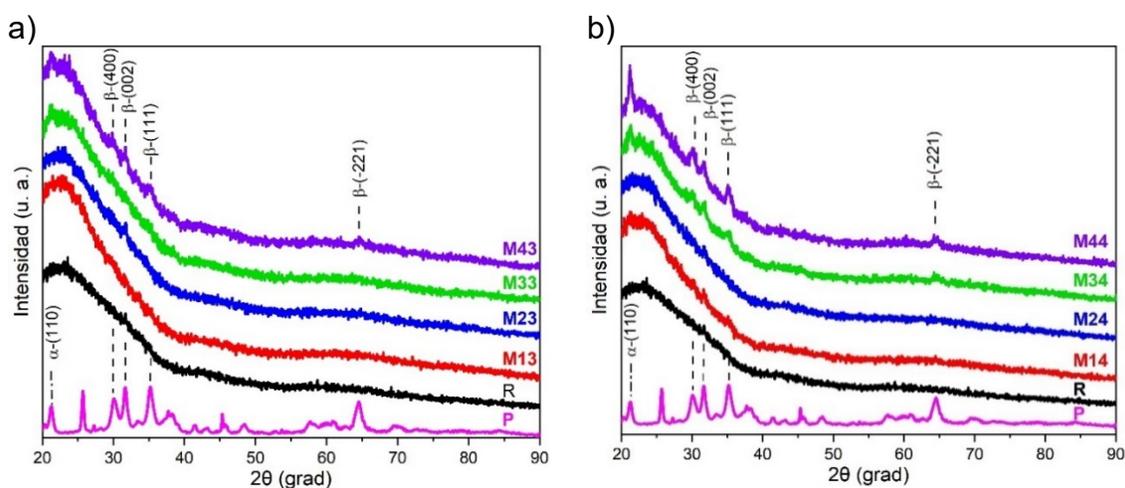


Figura 4.1 Patrones de difracción de rayos X (DRX). a) Conjunto de muestras en las que se empleó la suspensión coloidal 3, b) Conjunto de muestras en las que se empleó la suspensión coloidal 4.

En la parte inferior se muestra el patrón DRX del óxido de grafeno empleado para preparar las soluciones coloidales, etiquetado como P, y la muestra de TEOS de referencia, etiquetada como R.

Se calculó el tamaño de cristalito para las muestras M43 y M44, estas se eligieron por que presentan los picos de difracción más intensos y definidos, lo que se ha atribuido al número de capas. Los cálculos se realizaron considerando que las partículas son cuasi esféricas, como se muestra en los resultados SEM de la sección 4.3, por lo que se empleó  $k = 0.89$ ; el ancho medio de los picos y el error estimado estándar se obtuvieron esmpleando el software PDLX de Rigaku. Para la fase  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  se emplearon los 3 primeros picos de difracción a  $30.06^\circ$ ,  $31.7^\circ$  y  $35.18^\circ$  en ambas muestras, la fase  $\alpha\text{-GaOOH}$  a  $21.5^\circ$  solo fue calculada para M44 debido a que la muestra M34 no presente dicho pico; los resultados se presentan en la Tabla 4.1.

Muestra	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$
M43	4.96	—
M44	5.56	1.77

Tabla 4.1 Tamaños de cristal de las fases  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  y  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  de las muestras M43 y M44.

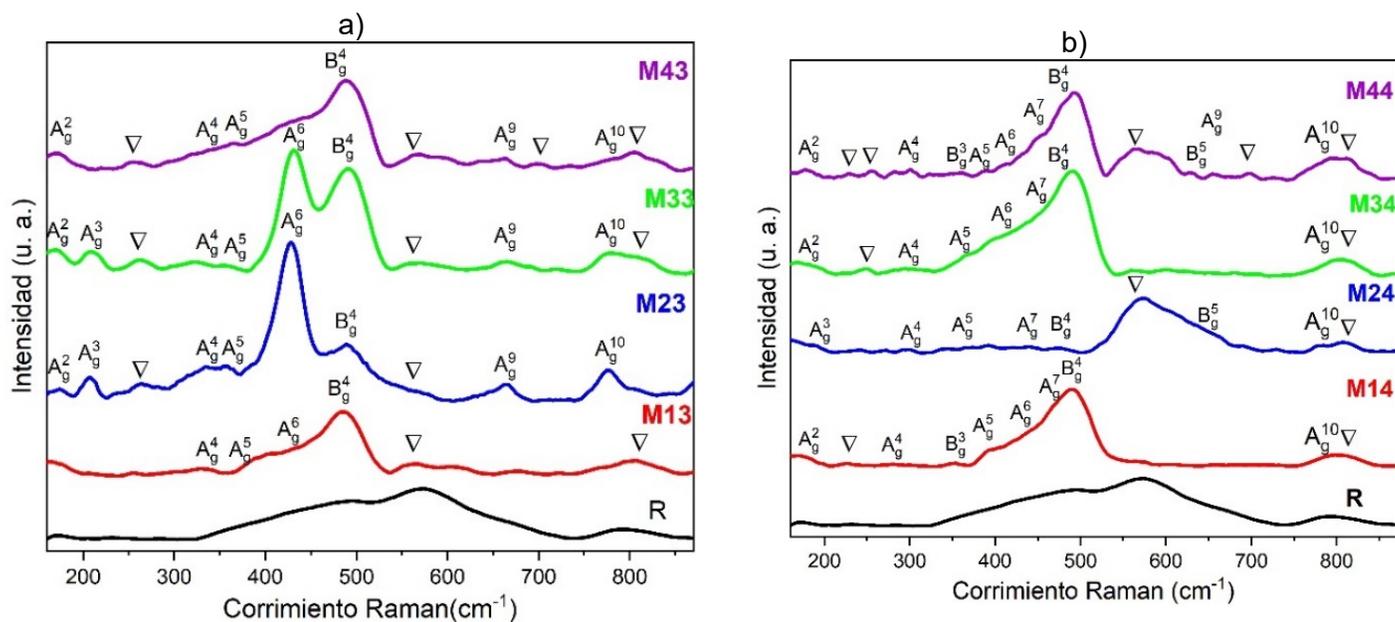
## 4.2 Caracterización composicional

El análisis composicional de las muestras fue realizado por micro Raman, los resultados se presentan en las Figuras 4.2a, 4.2b, 4.2c y 4.2d; el rango de las gráficas es  $160 - 900 \text{ cm}^{-1}$ , donde se han reportado modos vibratorios relacionados con los modos Ga-O, -OH y O-Ga-O (Zhao et al., 2008). De acuerdo con Liu, 2007, el óxido de galio presenta una rama óptica  $\Gamma_{\text{opt}} = 10A_g + 4A_u + 5B_g + 8B_u$ , de los cuales solo los modos  $A_g$  y  $B_g$  son activos en Raman(Liu et al., 2007). En la Tabla 4.2 se presenta la posición de las vibraciones obtenidas de las referencias (Zhao et al., 2008).

	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$
$A_g^1$	104.7	201
$A_g^2$	163.5	261
$A_g^3$	202.3	275

$A_g^4$	315.8	320
$A_g^5$	339.7	346
$A_g^6$	420.2	418
$A_g^7$	459.4	433
$A_g^8$	607.1	475
$A_g^9$	656.1	522
$A_g^{10}$	757.7	628
$B_g^1$	112.1	653
$B_g^2$	141.3	764
$B_g^3$	348.3	
$B_g^4$	472.8	
$B_g^5$	627.1	

Tabla 4.2 Modos vibracionales activos de  $\beta$ - $Ga_2O_3$  y  $\alpha$ - $Ga_2O_3$ . Datos obtenidos de Raman spectroscopy and characterization of  $\alpha$ -gallium oxyhydroxide and  $\beta$ -gallium oxide nanorods, (Zhao et al., 2008) y Lattice dynamical, dielectric, and thermodynamic proper ties of  $\beta$ - $Ga_2O_3$  from first principles, (Zhao et al., 2008).



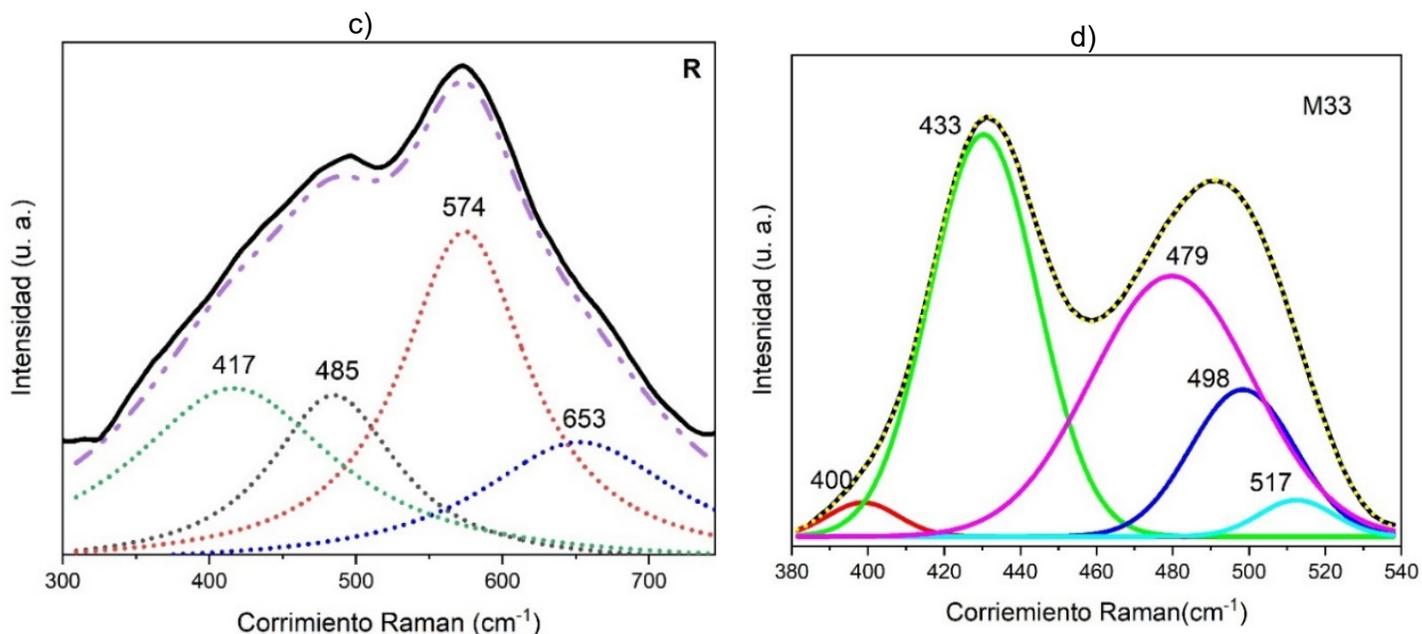


Figura 4.2 Espectros Raman. a) Muestras fabricadas con la suspensión coloidal 3, b) Muestras fabricadas con la suspensión coloidal 4, c) Deconvolución del espectro de la muestra de referencia (TEOS sin modificar), etiquetado como P, entre 300 y 800  $\text{cm}^{-1}$ , d) Deconvolución de la muestra de TEOS de referencia, etiquetada como R, entre 380 y 540  $\text{cm}^{-1}$ .

En la Figura 4.2C se presenta la deconvolución del espectro Raman de la muestra de TEOS de referencia, etiquetada como R. Los modos vibracionales obtenidos se han atribuido a enlaces Si-H (200-500  $\text{cm}^{-1}$ ), O-C-C (417  $\text{cm}^{-1}$ ) Si-O-Si (485  $\text{cm}^{-1}$ ) y  $\text{OC}_2\text{H}_5$  (653  $\text{cm}^{-1}$ ) relacionados con TEOS y sílice, además de enlaces B-O y B-O-B (574  $\text{cm}^{-1}$ ) relacionados con el material del portaobjetos (borosilicato) (Manara et al., 2009). Por otro lado, en la Figura 4.2d se presenta la deconvolución del espectro Raman de la muestra M33, en el rango de 380 a 540  $\text{cm}^{-1}$  (Koroleva et al., 2011). Los modos vibracionales observados se han atribuido a enlaces Ga-OH (400, 433, 479, 498 y 517  $\text{cm}^{-1}$ ) (Zhao et al., 2008).

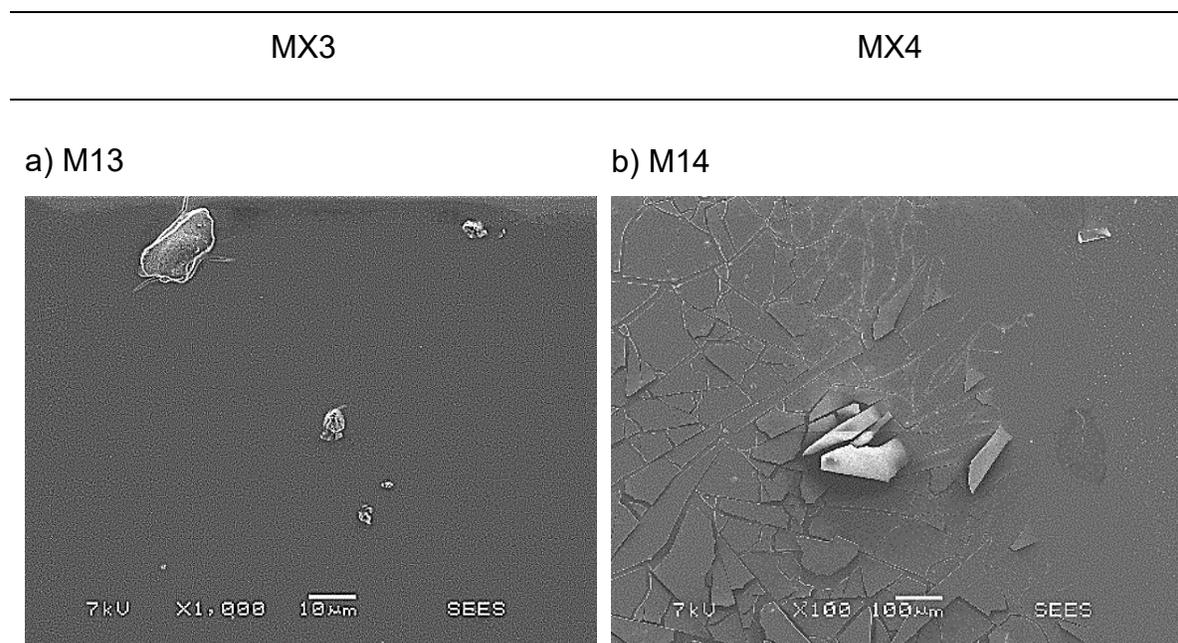
### 4.3 Caracterización morfológica

Se obtuvieron micrografías mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la morfología superficial de las muestras de TEOS modificadas con óxido de galio, los resultados se presentan en la Figura 4.3.

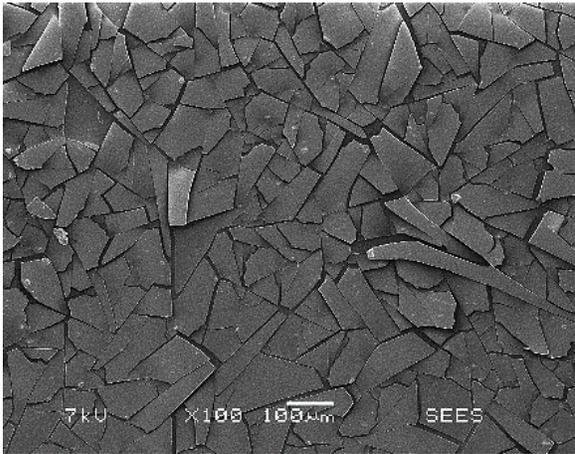
Algunas de las muestras asemejan a un vidrio roto, lo que se puede atribuir a la naturaleza vítrea del TEOS, en estos casos, los depósitos se han estrellado

posiblemente debido a la manipulación, algunos autores lo refieren como calles o canales, cuya presencia es característica del material (Juárez López & González Hernández, 2019). Asumimos que las partículas blancas, observadas sobre la superficie de las muestras se relacionan con la modificación del TEOS, es decir, que son partículas de óxido de galio incrustadas en la matriz porosa, acorde con el objetivo del trabajo.

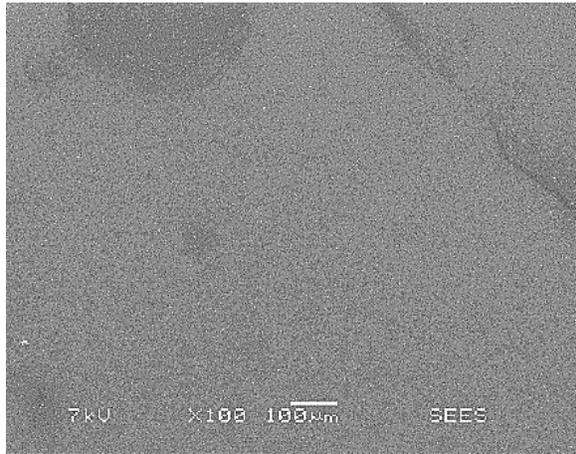
En general, es posible observar la presencia de pequeños aglomerados en color blanco, cuya presencia y distribución aumenta a medida que el número de capas aumenta, por ejemplo, en las muestras con una capa (M13 y M14, correspondientes a la Figura 4.3a y 4.3b) se observa la presencia de aglomerados aislados, estos tienden a cubrir la superficie y disminuir su tamaño (posiblemente por coalescencia) a medida que el número de capas aumenta (M43 y M44, correspondientes a la Figura 4.3e y 4.3f).



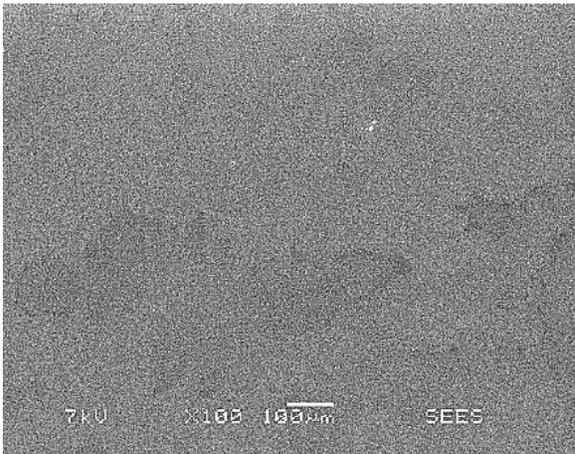
b) M23



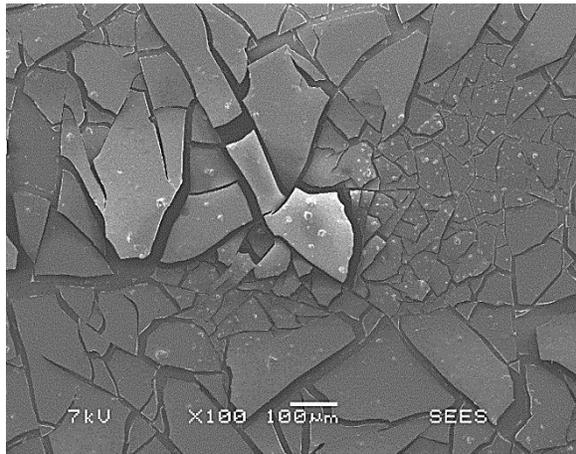
c) M24



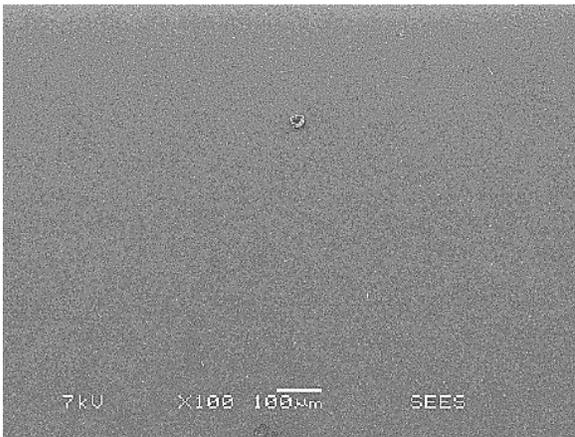
d) M33



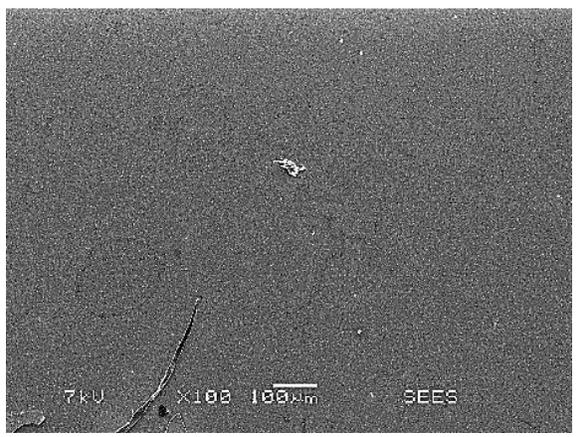
e) M34



e) M43



f) M44



*Figura 4.3 Fotografías obtenidas mediante SEM de las muestras modificadas con TEOS y óxido de galio.*

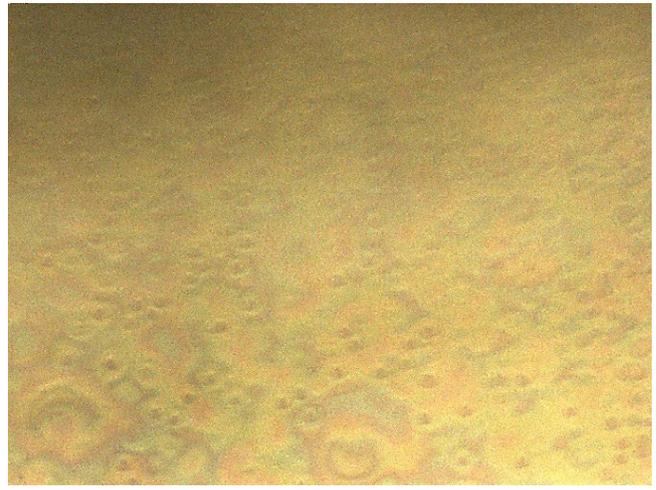
El conjunto de imágenes de la Figura 4.4 fueron obtenidas mediante una cámara digital, montada de fabrica en el equipo AFM marca Park Systems, moldeo X7. Las imágenes corresponden a las muestras fabricadas con el coloide C4 con 1 (M14), 2 (M24), 3 (M34) y 4 (M44) capas. Se puede apreciar la evolución de la superficie a medida que el número de capas aumenta.

En concordancia con los resultados SEM, la muestra con una capa presenta poros aislados (manchas oscuras), cuya distribución superficial aumenta con el número de capas. Con la acumulación de capas, el material tiende a formar regiones irregulares, con distribución aleatoria, aisladas por zangas o canales, a manera de un vidrio roto.

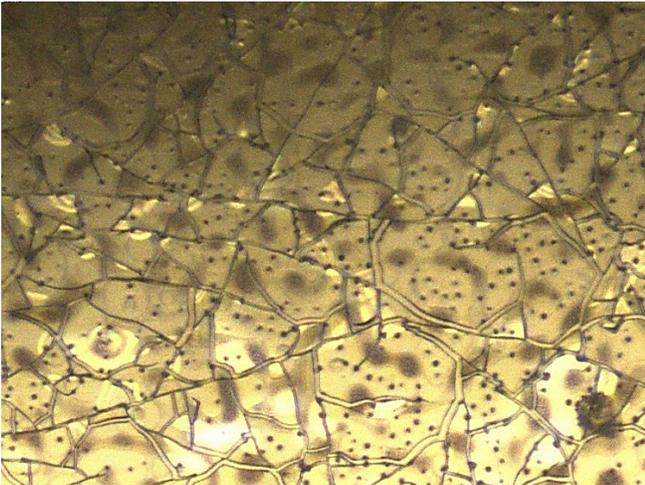
a)



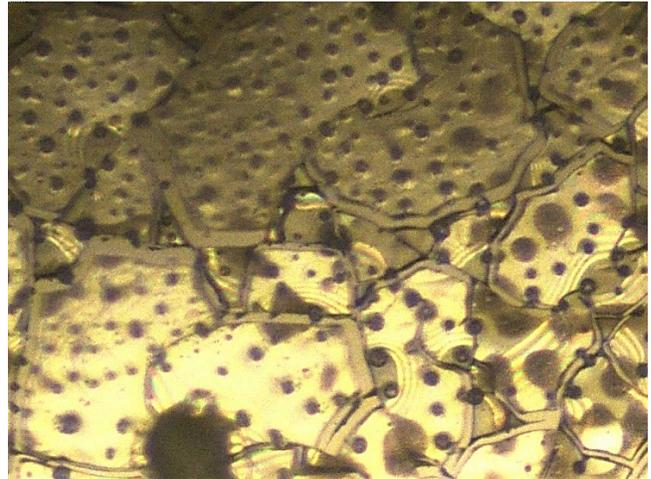
b)



c)



d)



*Figura 4.4 Fotografías de la superficie de las muestras A) M14, B) M24, C) M34 y D) M44*

De los resultados DRX, Raman y SEM se propone que al menos tres capas de TEOS modificado permitirían obtener una superficie con propiedades de adsorción de  $\text{CO}_2$ , debido a la mayor cobertura de los aglomerados de GaO, que actuarían como los puntos calientes para la detección del gas. Por otro lado, referente a la concentración, se observa que tanto C3 como C4 presentan resultados estructurales similares (DRX). Con lo anterior en cuenta, se determinó que las condiciones de la muestra M33 eran las adecuadas para verificar la viabilidad del material en la detección de  $\text{CO}_2$ , la concentración C3 fue elegida, en lugar de C4, por ser en la que emplea menor masa de GaO.

#### 4.4 Detección de $\text{CO}_2$

En la Figura 4.5 se muestra la respuesta del sensor resistivo, fabricado con las condiciones experimentales de la muestra M33, cuando es expuesto a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La caracterización del sensor se llevó a cabo mediante la medición de la corriente al aplicar un voltaje constante de 5 VDC, como se indica en la sección 3.4. Inicialmente, se obtuvo la línea base, la cual corresponde a la corriente a través del circuito en ausencia del gas a sensor. A fin de observar la

estabilidad del sensor, se muestran los primeros 60 segundos de la línea base (Figura 4.5), antes de ingresar el gas; siendo la resistencia promedio es de 20 M $\Omega$ .

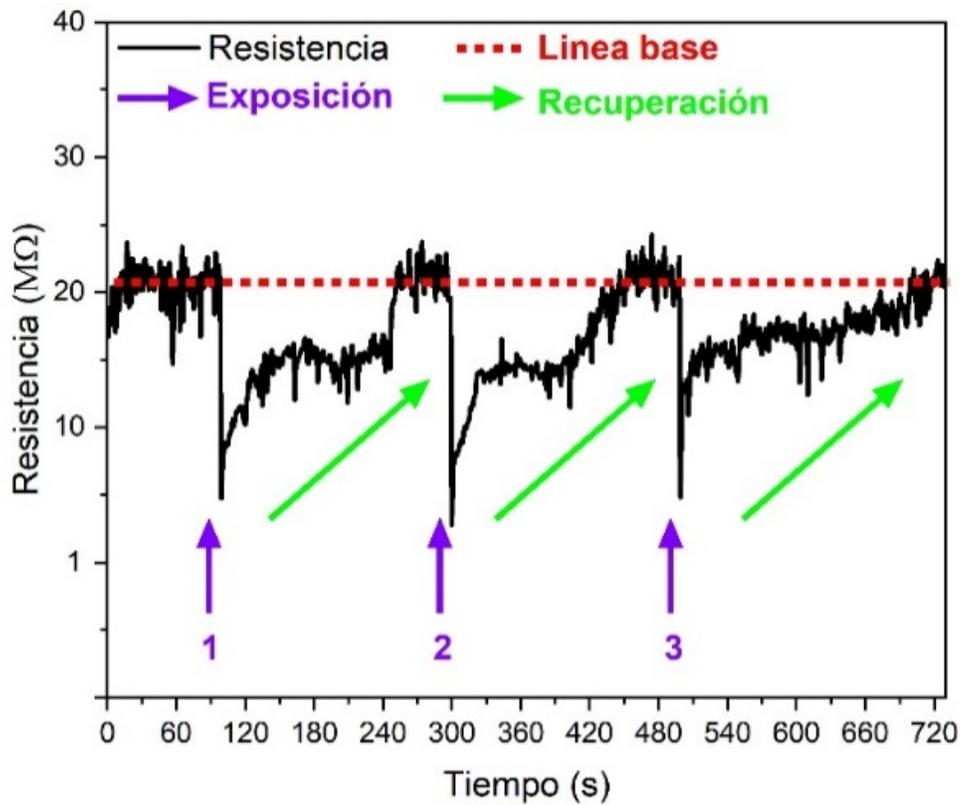


Figura 4.5 Respuesta del sensor resistivo a exposiciones de CO<sub>2</sub>, mostrando disminución de resistencia durante la exposición y recuperación posterior. Voltaje de medición: 5 VDC.

La exposición del sensor al CO<sub>2</sub> se realizó en tres ocasiones distintas, con una duración de 10 segundos por cada evento de exposición. La concentración de CO<sub>2</sub> no es controlada en estas pruebas debido a las limitaciones experimentales y a que solo se requiere una prueba de viabilidad. Sin embargo, confines de repetitividad, el sensor fue expuesto al gas durante lapsos de 5 segundos en cada una de las exposiciones. Es importante destacar que el tiempo de respuesta del sensor fue medido a partir del momento en que se introdujo el CO<sub>2</sub> en el sistema, no desde el momento en que se alcanzó una concentración específica del gas.

Durante estas exposiciones, se observa que la resistencia del sensor disminuye significativamente en presencia del gas, lo que indica un incremento en la corriente. Este comportamiento confirma la viabilidad para aplicar el material en la detección

de CO<sub>2</sub>. Se identificó que el tiempo de respuesta del sensor es de aproximadamente 2.5 segundos, que es el tiempo de retardo entre la introducción del gas y el inicio del cambio en la respuesta del sensor. Además, el tiempo de recuperación, definido como el periodo necesario para que la respuesta del sensor regrese a la línea base tras la remoción del gas, fue de alrededor de 4 minutos. Estos resultados indican que el material utilizado para la fabricación del sensor es adecuado y viable para aplicaciones en el desarrollo de dispositivos de detección de gases.

La capacidad del sensor para detectar el CO<sub>2</sub> con un tiempo de respuesta razonable y una recuperación efectiva subraya su potencial para ser utilizado en sistemas de monitoreo ambiental y otras aplicaciones relacionadas.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen las principales conclusiones derivadas de la investigación, destacando las contribuciones más significativas y su impacto en el campo de estudio. Además, se proponen recomendaciones para futuras investigaciones y posibles aplicaciones prácticas de los resultados obtenidos.

## 5.1 Conclusiones generales

Se logró sintetizar TEOS bajo las condiciones experimentales establecidas. Utilizando el proceso sol-gel, obtuvimos matrices de sílice altamente porosas, lo cual se comprobó mediante técnicas como la difracción de rayos X y la microscopía de fuerza atómica. Los resultados muestran que las estructuras obtenidas tienen una superficie amorfa.

Las condiciones experimentales para la obtención de óxido de galio ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) mediante la oxidación térmica de arseniuro de galio fueron reproducidas exitosamente. La calidad del  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  se verificó a través de difracción de rayos X, confirmando la pureza y la estructura cristalina del material. Los estudios de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) también respaldaron estos resultados, mostrando una composición uniforme de Ga y O sin la presencia significativa de impurezas.

Establecimos con éxito las condiciones para la incorporación de  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  en las matrices de TEOS. Los análisis de DRX de las matrices modificadas mostraron picos correspondientes a  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  disperso dentro de la estructura amorfa del TEOS, indicando la integración estructural de los materiales. La microscopía de fuerza atómica (AFM) confirmó una superficie rugosa y porosa, ideal para la adsorción de  $\text{CO}_2$ . Los resultados de espectroscopia infrarroja (FTIR) mostraron bandas características de enlaces Si-O-Ga, sugiriendo una fuerte interacción entre el óxido de galio y la matriz de sílice.

Se observa que, a partir de 3 capas de TEOS modificado, se obtiene una distribución uniforme del óxido de galio sobre la superficie de las muestras, manteniendo la naturaleza de la matriz porosa y vítrea del TEOS.

Los resultados de la caracterización del sensor indican que el TEOS modificado con óxido de galio tiene potencial para su aplicación en el desarrollo de sensores resistivos de  $\text{CO}_2$ .

## 5.2 Trabajo a futuro

En el marco de esta investigación sobre la modificación de matrices de TEOS con óxido de galio para la detección de CO<sub>2</sub>, se han identificado varias áreas de estudio futuras que podrían ampliar y optimizar los resultados obtenidos. Un área de oportunidad es la construcción de un sistema integral para la detección de gases, en el sistema para controlar la humedad, temperatura y concentraciones de gases. Este sistema permitiría la medición precisa y en tiempo real de concentraciones de CO<sub>2</sub> y otros gases, integrando tecnologías avanzadas de análisis y monitoreo.

Otro aspecto importante en la síntesis de TEOS es incorporar otros materiales como óxido de zinc, óxido de grafeno, grafito, etc. para la modificación con otros semiconductores, a fin de tener un material híbrido. Esta hibridación ayudaría a ampliar el abanico de materiales y sus posibles aplicaciones en diversas áreas de sensado, posibilitando la selectividad y potenciando su uso en diferentes entornos.

Por otro lado, se propone considerar estudiar el uso de otro tipo de sustratos, como de silicio y cobre, para incorporar calefactores que mejoren la detección de gases. Además, se propone emplear aluminio u oro para depositar contactos eléctricos, y estudiar las condiciones que aseguren contactos óhmicos.

Finalmente, se propone estudiar concentraciones de óxido de galio para identificar la composición óptima que maximice la sensibilidad y selectividad del material hacia el CO<sub>2</sub>. Este estudio optimizaría el diseño del sensor, mejorando su rendimiento y eficacia.

## Bibliografía

- Ágoston, P., Körber, C., Klenin, A., J. Pueska, M., M. Nieminen, R., & Albe, K. (2010). Limits for n -type doping in In<sub>2</sub> O<sub>3</sub> and SnO<sub>2</sub>: A theoretical approach by first-principles calculations using hybrid-functional methodology. *Journal of Applied Physics*, 108(5). <https://doi.org/10.1063/1.3467780>
- Alfieri, P., P. Traversa, L., Canosa, G., & A. Giudice, C. (2019). Pinturas híbridas de alto contenido de sólidos basadas en resina epoxi alifática-alcoxisilanos para la protección de maderas hybrid high solids coating based on aliphatic epoxy resin-alkoxysilanes for wood protection. *Ciencia y Tecnología de Los Materiales*.  
<https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/2a0b3f16-1e4e-4e9a-8e47-21a0288ce537/content>
- American Elements. (n.d.). *Gallium Oxide Pellets*. The Materials Science Manufacturer. Retrieved June 12, 2024, from <https://www.americanelements.com/gallium-oxide-pellets-12024-21-4>
- Arreche, R., N. Blanco, M., & G. Vázquez, P. (2016). Síntesis de sílice mediante el método sol-gel y su aplicación como aditivos antimicrobianos en pinturas higiénicas. *Revista Tecnología y Ciencia*, no. 28. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/118645>
- Arroyo, M., & Ramírez Monroy, A. (2020). Dióxido de carbono, sus dos caras. *Real Sociedad Española de Química*. [www.rseq.org](http://www.rseq.org)82
- Carburos metálicos. (2019). CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) un aliado desconocido. *Grupo Air Products and Chemicals, Inc*. <http://www.carburos.com/>
- Carranza Sánchez, A. C. (2020). *Caracterización de películas delgadas de óxido de zinc con aluminio (AZO) depositadas mediante erosión catódica modulando la potencia de plasma durante el crecimiento* [Tesis de Maestría,

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla].  
<https://hdl.handle.net/20.500.12371/9838>

Cruz López, E. (2021). *Efecto catalizador del óxido de galio en biogás* [Tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas].  
<https://hdl.handle.net/20.500.12753/4288>

Espinoza Ramos, G. M. (2003, January). Acidificación oceánica: una consecuencia preocupante del aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. *Revista Aquaciencia*, 2, 10–14.

Estrucplan. (2000, November 1). *Silicato de tetraetilo*. Estrucplan.  
<https://estrucplan.com.ar/SILICATO-DE-TETRAETILO/>

Eurolab. (n.d.). *Tetra Etil Orto Silikat (TEOS)*. Eurolab, Laboratory Services. Retrieved March 24, 2024, from [https://www.eurolab.net/testler/malzeme-testleri/tetra-etil-orto-silikat-\(teos\)-analizleri/](https://www.eurolab.net/testler/malzeme-testleri/tetra-etil-orto-silikat-(teos)-analizleri/)

García Carrión, M. (2021). *Síntesis y caracterización de micro- y nanomateriales de compuestos basados en óxido de galio* [Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/3534>

Gil, A. (2019). *Los países que más CO<sub>2</sub> generan del mundo*. El Orden Mundial.  
<https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/los-paises-que-mas-co2-generan-del-mundo/>

Guacon Coello, M. C. (2023). *Accionar del terapeuta respiratorio en paciente masculino de 75 años con insuficiencia respiratoria aguda asociada a EPOC* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Babahoyo].  
<http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14368>

Gutierrez, R., Alvarado Orbegoso, D. M., & Albertina, M. (2024). *Remoción de dióxido de carbono por biofiltración con *Chlorella vulgaris* bajo diferentes flujos de aire y dosificaciones de nutrientes* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional de Trujillo.

- Hernández Brenes, G. (2018). *Síntesis y caracterización de películas delgadas de óxido de galio (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoestructurado mediante spin coating*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Hernández, Y. (2019). Cambio climático: Causas y consecuencias. *Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*.
- Hotovy, I., Pezoldt, J., Kadlecikova, M., Kups, T., Spiess, L., Breza, J., Sakalauskas, E., Goldhahn, R., & Rehacek, V. (2010). Structural characterization of sputtered indium oxide films deposited at room temperature. *Thin Solid Films*, 518(16), 4508–4511. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.12.018>
- Jiménez-Torres, A. del C. (2021). La diversidad mejora el almacenamiento de carbono en los bosques tropicales. *RECIMUNDO*, 5(3), 316–323. [https://doi.org/10.26820/recimundo/5.\(3\).sep.2021.316-323](https://doi.org/10.26820/recimundo/5.(3).sep.2021.316-323)
- Juárez López, V., & González Hernández, M. (2019). Desarrollo y caracterización de un sensor de fibra óptica por la técnica Sol-Gel utilizando Rodamina B (RhB) y Rutenium (II) Dichlorides como precursores, para la determinación de pH en líquidos (Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas).
- Koroleva, O. N., Shabunina, L. A., & Bykov, V. N. (2011). Structure of borosilicate glass according to raman spectroscopy data. *Glass and Ceramics (English Translation of Steklo i Keramika)*, 67(11–12), 340–342. <https://doi.org/10.1007/S10717-011-9293-0/METRICS>
- Lan, Y. C., Crimp, M. A., & Zhang, J. M. (2006). Anisotropic vapor phase growth of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystalline nanobelts. *Journal of Crystal Growth*, 290(2), 585–591. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2005.12.081>
- Lastra Medina, G. (2010). *El sistema ternario Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a 1300 °C en aire* [Tesis de Maestría, Universidad de Sonora]. <http://hdl.handle.net/20.500.12984/421>

- Liu, B., Gu, M., & Liu, X. (2007). Lattice dynamical, dielectric, and thermodynamic properties of B- Ga<sub>2</sub> O<sub>3</sub> from first principles. *Applied Physics Letters*, 91(17). <https://doi.org/10.1063/1.2800792/334341>
- López García, I. (2014). *Propiedades físicas y dopado de nanoestructuras de óxido de galio* [Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/25817>
- López, I., D. Utrilla, A., Nogales, E., Méndez, B., Piqueras, J., Peche, A., Ramírez-Castellanos, J., & González-Calbet, J. M. (2012). In-doped gallium oxide micro- and nanostructures: Morphology, structure, and luminescence properties. *Journal of Physical Chemistry C*, 116(6), 3935–3943. <https://doi.org/10.1021/jp210233p>
- Manara, D., Grandjean, A., & Neuville, D. R. (2009). Advances in understanding the structure of borosilicate glasses: A Raman spectroscopy study. *American Mineralogist*, 94(5–6), 777–784. <https://doi.org/10.2138/AM.2009.3027>
- Molina, M. F., Ordóñez, O., & Carriazo, J. G. (2024). Concepciones sobre el dióxido de carbono y su influencia en el cambio climático: intervención didáctica valorativa y experimental. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 21(1). [https://doi.org/10.25267/rev\\_eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2024.v21.i1.1503](https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i1.1503)
- Moliner Merino, L. (2013). *Producción de monoglicéridos por esterificación de glicerina con ácidos cinámico y p-metoxicinámico* [Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/37206>
- Nakagomi, S., & Kokubun, Y. (2017). Crystal orientation of monoclinic  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films formed on cubic MgO substrates with a  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interfacial layer. *Journal of Crystal Growth*, 479, 67–74. <https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2017.09.028>

- Nakamura, S., Mukai, T., & Senoh, M. (1994). Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 64(13), 1687–1689. <https://doi.org/10.1063/1.111832>
- NASA. (2024). *Dióxido de carbono*. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>
- Navas-Cendúa, M. A., Sarmiento Santos, A., & Álvarez, B. (2022). Estudio sobre los diferentes métodos de captura de CO<sub>2</sub> y aplicaciones de la descarga luminiscente anormal. *Hábitus Semilleros de Investigación*, 2(4), 1-8. <https://doi.org/10.19053/22158591.13647>
- Nguyen Thuy, T. H., Fukaya, N., Sato, K., Jun-Chul, C., & Kataoka, S. (2022). Design and assessment of an energy self-supply process producing tetraethyl orthosilicate using rice husk. *Bioresource Technology*, 344(Pt B). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126188>
- Ortiz Gallegos, C. C. (2007). *Técnicas analíticas para caracterizar la modificación superficial de sílica con aminosilinos* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada]. <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/447>
- Palma-Barrera, J. P., Sánchez-Ramírez, E., Ramírez-Márquez, C., Cervantes-Jauregui, J. A., & Segovia-Hernández, J. G. (2019). Reactive Distillation Column Design for Tetraethoxysilane (TEOS) Production. Part II: Dynamic Properties and Inherent Safety. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(1), 259–275. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04962>
- Pearton, S. J., Ren, F., & Mastro, M. A. (2018). *Gallium Oxide: Technology, Devices and Applications* (Vol. 1). Elsevier Science and Technology.
- Pearton, S. J., Yang, J., Cary, P. H., Ren, F., Kim, J., Tadjer Marko, J., & Mastro, M. A. (2018). A review of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials, processing, and devices. *Applied Physics Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1063/1.5006941>

- Quelal Torres, E. S., & Paredes López, C. A. (2024). *Diseño de un sistema de alerta oportuna para CO en un automóvil con técnicas de monitoreo y control para el bloqueo del motor en un vehículo* [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27079>
- Ramírez González, F. S. (2011). *Estudio de sensor de gas basado en silicio poroso tipo-n y tipo-p, expuesto a etanol y acetona* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla].
- Rodríguez Baltazar, J. A. (2019). *Síntesis y caracterización del semiconductor magnético diluido nanoestructurado CdS:Mn con aplicaciones potenciales en la fabricación de dispositivos electrónicos*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/9147>
- Roth. (2024). *Ficha de datos de seguridad: Óxido de galio (III) min. 99,99 %, p.a.* [www.carlroth.de](http://www.carlroth.de)
- Shi, F., & Qiao, H. (2022). Preparations, properties and applications of gallium oxide nanomaterials – A review. *Nano Select*, 3(2), 348–373. <https://doi.org/10.1002/nano.202100149>
- Villarreal Obregón, I. (2023). *Diseño de un sistema automatizado para el monitoreo en tiempo real del monóxido de carbono en la Compañía Minera Ares, Unidad Pallancata, 2021* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <http://hdl.handle.net/20.500.14067/8170>
- Zacapantzi Muñoz, J. E. (2015). *Síntesis de partículas de óxido de galio ( $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) mediante electrólisis y su caracterización estructural-optica* [Tesis de Licenciatura, Benemérita universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/6160>

Zhao, Y., & Frost, R. L. (2008). Raman spectroscopy and characterisation of  $\alpha$ -gallium oxyhydroxide and  $\beta$ -gallium oxide nanorods. *Journal of Raman Spectroscopy*, 39(10), 1494–1501. <https://doi.org/10.1002/JRS.2028>