



---

---

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“OBTENCIÓN DE IONOMERO DE VIDRIO MODIFICADO  
CON PARTÍCULAS DE CaO Y EVALUACIÓN DE SUS  
PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO EN MATERIALES**

PRESENTA

JOSÉ ARMANDO ANTONIO SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. EFRAÍN RUBIO ROSAS

ASESOR

MTRA. ERIKA MUÑOZ GRACIA

H. Puebla Z., JUNIO 2025



## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre y a mi abuela, cuyo amor incondicional, apoyo constante y sacrificio silencioso han sido un pilar para alcanzar este logro.

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a dios por la salud la fortaleza y la oportunidad de poder estudiar y culminar esta tesis, un paso significativo en mi formación profesional.

Mi sincero agradecimiento al Dr. Efraín Rubio Rosas, mi asesor, por su guía constante, por brindarme las herramientas necesarias y por su apoyo durante todo este proceso. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para realizar este proyecto.

A mi asesora, Mtra. Erika Muñoz Gracia, por su disposición permanente, por ofrecerme nuevas perspectivas de trabajo y por ser una persona paciente, dedicada y siempre dispuesta a compartir sus conocimientos.

Agradezco profundamente a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por brindarme el espacio académico necesario para desarrollar mi formación profesional y proporcionarme los recursos que enriquecieron mi aprendizaje.

A mis sinodales , quienes evaluaron mi trabajo con compromiso y profesionalismo, y cuyas observaciones enriquecieron mi significativamente este proyecto.

A mi madre, por su amor incondicional, su paciencia y su constante apoyo a lo largo de mi formación .Gracias por creer siempre en mí.

A mi familia ,que con su ejemplo, cariño y respaldo continuo, me inspiraron a seguir adelante y superarme cada día. Su apoyo ha sido una fuente constante de motivación.

A mis amigos que fueron una parte esencial en este camino. Gracias por sus palabras de aliento, por su compañía y por hacer más amena mi experiencia universitaria.

Agradezco también a DITCO por su empatía y por facilitarme equipos y materiales para la elaboración de esta tesis , A el departamento de biología, por compartir su tiempo y enseñarme nuevas técnicas que enriquecieron mi trabajo. Y a la facultad de estomatología , por su disposición para apoyarme con los recursos necesarios.

A todos, gracias por haber formado parte de este proceso.

## ÍNDICE TEMÁTICO

ÍNDICE TEMÁTICO .....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
RESUMEN.....	VIII
INTRODUCCIÓN .....	IX
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Nanomateriales .....	1
1.1.1 Clasificación de nanomateriales por dimensión .....	2
1.1.2 Propiedades de los nanomateriales .....	2
1.1.3 Síntesis y procesamiento de nanomateriales: Métodos físicos y químicos más utilizados .....	4
1.2 Propiedades y aplicaciones de los ionómeros de vidrio .....	7
1.2.1 Estructura y composición de los ionómeros de vidrio .....	7
1.2.2 Propiedades fisicoquímicas.....	7
1.2.3 Procesamiento.....	8
1.2.4 Ionómero de vidrio modificado .....	9
1.3 Óxido de calcio (CaO).....	11
1.3.1 Propiedades y estructura del CaO.....	11
1.3.2 Método de síntesis .....	12
1.3.3 Mecanismo de reactividad.....	13
1.3.4 Aplicaciones de las partículas de CaO .....	14
1.4 Interacción entre compuestos antimicrobianos y microorganismos orales.....	18
1.4.1 Características de <i>Enterococcus faecalis</i> y <i>Streptococcus mutans</i> .....	19
OBJETIVOS.....	21

CAPITULO II. METODOLOGÍA.....	22
2.1 Obtención de las partículas de CaO.....	23
2.2 Obtención de ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO	24
2.3 Evaluación de las propiedades antimicrobianas de las partículas ....	26
2.4 Evaluación de las propiedades antimicrobianas en el ionómero de vidrio modificado con CaO .....	28
2.5 Técnicas de caracterización .....	28
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	30
3.1 Obtención de partículas de CaO .....	30
3.1.1 Difracción de rayos X.....	34
3.1.2 Microscopia Electrónica de Barrido.....	36
3.1.2 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de los cascarones de huevo y del CaO.....	39
3.2 Obtención de compósitos.....	41
3.2.1 Difracción de rayos X del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO..	42
3.2.2 Microscopia Óptica del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO ....	44
3.2.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO .....	46
3.3 Determinación de la concentración mínima inhibitoria de partículas de CaO .....	48
3.4 Evaluación de efecto antibacterial de compósitos.....	52
CAPITULO IV. CONCLUSIONES.....	57
CAPITULO V. BIBLIOGRAFÍA .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1. Clasificación de los nanomateriales según su dimensión (QuímicaViva, et 2023).....	2
Figura I-2. Diagrama para la obtención de un ionómero de vidrio (Lohbhauer, U. 2009).....	9
Figura I-3. Estructura del CaO (Briceño V., Gabriela, 2021). .....	11
Figura II-1. Diagrama de flujo. ....	22
Figura II-2. Capsula de fibra cerámica con recubrimiento de carburo de silicio. ....	24
Figura II-3. a) Partículas de vidrio y ácido poliacrílico, que conforman el ionómero de vidrio. b) lámpara de foto curado blue phase N de la marca VIVADENT. ....	26
Figura II-4. Procedimiento para determinar las propiedades antibacteriales de las partículas de CaO. ....	27
Figura III-1. a) Cascarones de huevo limpios, b) reducción del tamaño de partícula de CaCO <sub>3</sub> por medio del molino de bolas y c) tamizado con malla 325. 30	
Figura III-2. Muestras calcinadas: (a) Tiempo de 9 minutos y potencia de 5, (b) tiempo de 16 minutos y potencia de 4, (c) tiempo de 12 minutos y potencia de 4. ....	32
Figura III-3. Proceso para la calcinación de las partículas de CaCO <sub>3</sub> .....	33
Figura III-4. difractogramas DRX de partículas de CaO sintetizadas a partir de CaCO <sub>3</sub> por medio de horno de microondas. ....	35
Figura III-5. Partículas de CaO en el microscopio electrónico de barrido con una resolución de a) x5000 y b) x10000. ....	37
Figura III-6. histograma de la distribución del diámetro de las partículas de CaO.....	38
Figura III-7. Espectro FTIR de cascarones de huevo y partículas de CaO.....	39
Figura III-8. a) pesaje de compuestos y b) probetas de ionómero de vidrio modificado.....	41

Figura III-9. Difractograma ionómero de vidrio modificado con <i>CaO</i> en porcentajes del 0%, 15%, 20% y 25%.....	42
Figura III-10. Probetas de ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO en concentración del a) 0%, b) 15%, c) 20% y d) 25% con lente 50x. ....	45
Figura III-11. Espectro FTIR de las probetas de ionómero de vidrio modificado con partículas de <i>CaO</i> en concentraciones de 0%, 15%, 20% y 25%. ....	47
Figura III-12. Placas de elisa con las cepas <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> 25923 y para <i>Staphylococcus aureus</i> BA477 contra partículas de CaO. ....	48
Figura III-13. resultados de la prueba de microdilución en caldo para las cepas <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27553, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923 y <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC BAA 977 (+).....	49
Figura III-14. Resultados de la prueba de microdilución en caldo para las cepas <i>Enterococcus faecalis</i> y <i>Streptococcus mutans</i> ATCC 25175.....	51
Figura III-15. Segunda microdilución en caldo para la bacteria <i>Streptococcus mutans</i> ATCC 25175. ....	51
Figura III-16. resultados de la microdilución en caldo de la cepa <i>Streptococcus mutans</i> ATCC 25175.....	52
Figura III-17. halos de inhibición en los tratamientos a a) 0%, b) 15%, c) 20% y d) 25% en la cepa <i>Enterococcus faecalis</i> .....	53
Figura III-18. halo de inhibición de las probetas de ionómero de vidrio modificado con CaO en concentraciones del a) 0%, b)15%, c) 20% y d) 25% en la cepa <i>Streptococcus mutans</i> ATCC 25175. ....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1. Tabla de parámetros para la calcinación.....	24
Tabla II-2. Condiciones para trabajar el ionómero de vidrio según el fabricante.....	26
Tabla III-1. Datos obtenidos de halos de inhibición para la cepa <i>Enterococcus faecalis</i> .....	54
Tabla III-2. Datos obtenidos de halos de inhibición para la cepa <i>Streptococcus mutans</i> ATCC 25175. ....	54
Tabla III-3. Porcentaje de inhibición de las probetas modificadas sobre una caja Petri. ....	55
Tabla III-4. Porcentaje de inhibición de las probetas modificadas sobre una caja Petri. ....	55

## RESUMEN

En este trabajo se obtuvieron partículas de CaO a partir de cascarones de huevo mediante un proceso de calcinación asistida por microondas. El análisis por SEM reveló que las partículas presentan una morfología esférica, con un diámetro promedio de 0.609  $\mu\text{m}$ , distribución de tamaño entre 0.4 y 0.7  $\mu\text{m}$ . Los resultados por DRX confirmaron la presencia de la estructura cristalina de CaO con picos característicos de 32°, 37°, 54° en  $2\theta$ . La CMI de las partículas de CaO fue de 1.6 mg/ml contra *Enterococcus faecalis* y 0.66 mg/ml contra *Streptococcus mutans*.

Se evaluaron compósitos de ionómero de vidrio comercial modificados con partículas de CaO en 0, 15, 20 y 25 % en peso. Se observó cambios progresivos desde una apariencia amorfa y translúcida hasta un material cada vez más opaco, la aparición de poros y grietas a mayor concentración de partículas. La actividad antibacteriana de los compósitos se determinó mediante ensayos de difusión en placa contra *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans*, mostrando halos de inhibición de 1.3 cm y 0.56 cm correspondientes a reducciones del de 15.3% y 6.5% respectivamente.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales ha experimentado un notable auge en las últimas décadas, especialmente en sectores de alta exigencia tecnológica y médica, como la odontología. El ionómero de vidrio se ha consolidado como un material de referencia en las restauraciones dentales debido a su biocompatibilidad, adhesión química al diente y liberación controlada de flúor (Ashour et al., 2022). Sin embargo, la optimización de sus propiedades mecánicas y antimicrobianas continúa siendo un desafío que puede abordarse mediante la incorporación de partículas funcionales. En este contexto, la modificación del ionómero de vidrio mediante la adición de pequeñas partículas de óxido de calcio representa una estrategia innovadora. Estas partículas, a diferencia del CaO a escala macro, presentan un tamaño reducido y un área superficial aumentada, lo cual les confiere una reactividad y conductividad excepcionales que potencian la actividad antimicrobiana del material.

La necesidad de explorar nuevos compósitos en la ingeniería de materiales se fundamenta en la búsqueda de productos que no solo mejoren la eficacia en la prevención de infecciones, sino que además impulsen el avance científico y tecnológico, contribuyendo a mejorar la calidad de vida. En respuesta a ello, el presente estudio tiene como objetivo obtener y caracterizar compósitos de ionómero de vidrio modificados con pequeñas partículas de CaO y evaluar su efectividad microbiológica contra *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans*. La metodología desarrollada parte de la utilización de cascarones de huevo, ricos en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que son sometidos a un proceso de limpieza y trituración. Posteriormente, mediante una calcinación asistida por microondas, el  $\text{CaCO}_3$  se transforma en CaO, obteniéndose partículas de tamaño reducido que aportan propiedades diferenciadoras en comparación con aquellas a macroescala (Ramola et al., 2019).

La actividad antimicrobiana de las partículas de CaO se evaluó inicialmente a través de la técnica de microdilución en caldo, lo que permitió determinar su concentración mínima inhibitoria. Una vez caracterizadas estas propiedades, se

procedió a incorporar las pequeñas partículas de CaO en un ionómero de vidrio comercial, formulando compósitos con diferentes proporciones de 0, 15, 20 y 25 % en peso de CaO y respetando las condiciones de procesamiento indicadas por el fabricante. La evaluación antibacterial de los compósitos modificados se realizó mediante la medición de los halos de inhibición en cajas Petri, método que permitió apreciar la eficacia del ionómero modificado en la inhibición del crecimiento bacteriano (Silva et al., 2020; Chaudhari et al., 2023).

Adicionalmente, la caracterización morfológica y estructural de los compósitos se llevó a cabo mediante técnicas avanzadas, como la microscopía electrónica de barrido (SEM), la difracción de rayos X (DRX) y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) (Lima et al., 2025). Este estudio pretende demostrar la viabilidad y los beneficios de incorporar pequeñas partículas de CaO en ionómeros de vidrio, estableciendo una correlación entre la modificación estructural del compósito y la mejora en sus propiedades antimicrobianas. Los hallazgos obtenidos no solo contribuirán al avance en la ingeniería de materiales multifuncionales con aplicaciones en odontología, sino que también podrían abrir nuevas vías en el desarrollo de biomateriales destinados a la prevención de infecciones y a otros campos de la salud (Robertson & Willett, 2023).

## **CAPITULO I. MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Nanomateriales**

En la búsqueda frecuente de nuevos materiales y tecnologías que revolucionen múltiples campos científicos y tecnológicos, los nanomateriales han sido importantes. Las partículas y nanopartículas han atraído la atención debido a sus propiedades únicas y sus aplicaciones potenciales en una amplia gama de áreas, desde la medicina hasta la electrónica (Atchudan et al., 2022).

Un nanomaterial es aquel material cuyas dimensiones están dentro del rango de 1 a 100 nanómetros. Los nanomateriales se anuncian como el control o manipulación y reestructuración de la materia a una escala de nanómetros con la intención de crear nuevos materiales con nuevas o distintas propiedades. En los últimos años las aplicaciones de los nanomateriales han crecido de una manera exponencial en todo el mundo debido a que se quiere entender las funciones y el potencial de los materiales nanoestructurados. Por otro lado, surge la necesidad de investigar nuevas formas para procesar los actuales nanomateriales que han sido de gran ayuda en varias áreas como en la medicina por ejemplo en la administración de fármacos en donde los medicamentos nanoestructurados tienen una mayor eficacia que los medicamentos convencionales, en la industria alimenticia haciendo una mejora de la absorción de nutrientes debido a que los nanomateriales pueden aumentar la solubilidad y biodisponibilidad de ciertos nutrientes, como vitaminas y minerales., así como también en la ingeniería en materiales han tenido un impacto significativo ya que ha revolucionado la forma en que se diseñan y producen materiales y se aplica en distintas áreas como en la mejora de propiedades físicas (César Germán Lizarazo-Salcedo et al., 2018).

Uno de los aspectos más importantes para tener en cuenta en el desarrollo de nanomateriales que estarán en contacto con el ser humano es la búsqueda de la biocompatibilidad, así como aquellos que puedan degradarse con gran facilidad cuidando siempre de no generar subproductos tóxicos que puedan dañar al medio ambiente y al ser humano (Villegas et al., 2008).

## 1.1.1 Clasificación de nanomateriales por dimensión

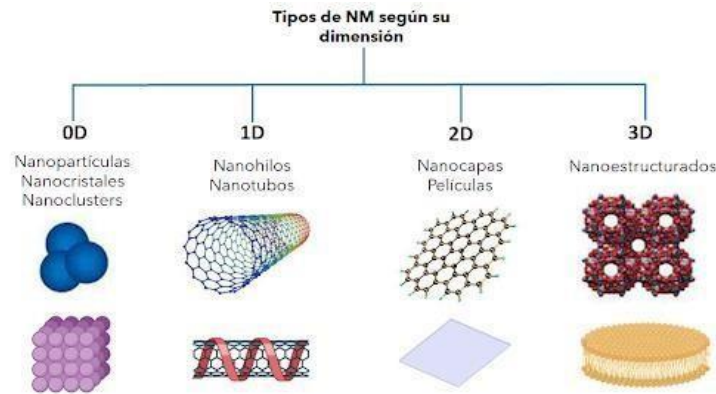


Figura I-1. Clasificación de los nanomateriales según su dimensión (Estrada-Flores, S. L., Garcías-Morales, 2023). *Nanomateriales: conceptos, aplicación en nanoterapia y regulaciones*

### Nanomateriales 0D (Zero-dimensional)

Estos son puntos cuánticos o nanopartículas que tienen dimensiones nanométricas en las tres direcciones. Ejemplo: nanopartículas de oro.

### Nanomateriales 1D (One-dimensional)

Tienen una dimensión nanométrica y dos dimensiones mayores. Ejemplo: nanotubos de carbono, nanohilos.

### Nanomateriales 2D (Two-dimensional)

Tienen dos dimensiones nanométricas y una dimensión mayor. Ejemplo: grafeno, óxidos metálicos en capas delgadas.

### Nanomateriales 3D (Three-dimensional)

Tienen estructuras complejas con dimensiones nanométricas en todas las direcciones. Ejemplo: nanoporos, materiales aerogel (Borja-Borja, 2020).

## 1.1.2 Propiedades de los nanomateriales

### Propiedades físicas

Aumento de la Relación Superficie-Volumen: Los nanomateriales tienen una relación superficie-volumen extremadamente alta, lo que les confiere una mayor reactividad y propiedades catalíticas. Debido a su pequeño tamaño, tienen una gran

cantidad de átomos en su superficie en comparación con su volumen total, además pueden tener una mayor resistencia y durabilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones estructurales en ingeniería y construcción.

**Fenómenos Cuánticos:** A escalas nanométricas, los efectos cuánticos se vuelven significativos, alterando las propiedades ópticas, electrónicas y magnéticas de los materiales. Cuando las partículas se reducen a escalas nanométricas, los electrones y otros portadores de carga están confinados en un espacio pequeño, lo que altera sus niveles de energía y propiedades electrónicas. Las propiedades electrónicas, ópticas y magnéticas de los nanomateriales pueden cambiar significativamente con el tamaño de las partículas. Por ejemplo, los puntos cuánticos pueden exhibir propiedades de emisión de luz que varían con su tamaño. Además, los nanomateriales pueden mostrar propiedades ópticas únicas como la fluorescencia y la absorción de luz en longitudes de onda específicas, útiles en aplicaciones de imagenología y sensores (Mendoza Doroteo et al, 2003).

### **Propiedades químicas**

**Reactividad Química:** La alta superficie específica hace que los nanomateriales sean más reactivos, permitiendo reacciones químicas más rápidas y eficientes. La reactividad química de los nanomateriales puede ser ajustada para ser selectiva hacia ciertas reacciones, mejorando la eficiencia y reduciendo subproductos no deseados. Se utilizan en la catálisis heterogénea, la eliminación de contaminantes, la producción de energía y la fabricación de productos farmacéuticos.

**Estabilidad Química:** En algunos casos, los nanomateriales pueden tener una mayor estabilidad química debido a sus estructuras específicas, tienen una alta reactividad debido a su gran relación superficie-volumen, lo que puede llevar a la oxidación o corrosión si no se controla adecuadamente. La estabilidad de los nanomateriales en soluciones depende de factores como el pH, la concentración de iones y la presencia de agentes estabilizantes.

### **Propiedades mecánicas**

**Resistencia y Dureza:** Algunos nanomateriales, como los nanotubos de carbono, son muy fuertes y duros debido a la disposición de sus átomos y enlaces

estos pueden alcanzar resistencias a la tracción de hasta 1 GPa (gigapascales). La incorporación de nanopartículas en matrices metálicas puede mejorar tanto la resistencia como la dureza. Por ejemplo, la adición de partículas de dióxido de zirconio ( $ZrO_2$ ) a una aleación de aluminio puede aumentar la dureza hasta 144.3 HV (Vickers Hardness) con un contenido del 9% de  $ZrO_2$  (Monther A. Dokhy, 2023).

**Flexibilidad:** Pueden ser más flexibles y dúctiles comparados con sus contrapartes macroscópicas debido a la disposición y enlace a nivel nanométrico. Los nanomateriales flexibles incluyen grafeno, nanotubos de carbono y polímeros nanoestructurado. Se han desarrollado modelos computacionales para simular la flexibilidad de los nanomateriales, permitiendo predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones de estrés (SarithNaidu T., 2024).

### **1.1.3 Síntesis y procesamiento de nanomateriales: Métodos físicos y químicos más utilizados**

#### **Métodos físicos**

**Evaporación Térmica:** Proceso en el cual un material se evapora y se deposita en forma de película delgada sobre un sustrato. La temperatura de evaporación varía según el material. el aluminio (Al) se evapora alrededor de  $1500^{\circ}C$ , mientras que el oro (Au) lo hace a aproximadamente  $2000^{\circ}C$ . El proceso se realiza en condiciones de vacío de aproximadamente  $10^{-6}$  a  $10^{-9}$  Torr para minimizar la presencia de gases residuales que pueden contaminar la película. Las tasas de deposición pueden variar, pero típicamente están en el rango de 0.1 a 10 nanómetros por segundo (nm/s).

**Depósito Químico en Fase Vapor (CVD):** Técnica que utiliza reacciones químicas para depositar capas finas de materiales sobre un sustrato. Entre algunos materiales comunes para esta aplicación tenemos Nitruro de Silicio ( $Si_3N_4$ ): Utilizado como capa aislante en semiconductores, Óxido de Silicio ( $SiO_2$ ): Utilizado como dieléctrico en dispositivos electrónicos y Metales Orgánicos: Utilizados en la fabricación de semiconductores y estructuras heterogéneas (Zanella, R. 2012).

**Molienda Mecanoquímica:** Método que utiliza fuerzas mecánicas para reducir el tamaño de partículas en el rango de 1 a 100 nanómetros. La molienda

mecanoquímica implica la trituración de materiales sólidos utilizando equipos como molinos planetarios y tamizadoras vibratorias. Se utilizan materiales como polvo de hierro, alúmina y otros compuestos metálicos (Junyi Gao. 2015).

Implantación de Iones: Proceso en el cual iones son acelerados y dirigidos hacia un material para modificar sus propiedades. La profundidad de penetración de los iones depende de su energía y la especie del ion. Generalmente, los rangos de penetración están entre 10 nanómetros y 1 micrómetro, la implantación de iones puede causar cambios químicos y estructurales en el material objetivo. Estos cambios pueden incluir la formación de nuevas fases, la modificación de la estructura cristalina y la inducción de tensiones internas.

### **Métodos químicos**

Método Coloidal: Síntesis de nanopartículas en soluciones coloidales mediante la reducción de iones metálicos en donde las nanopartículas producidas pueden tener un tamaño en el rango de 1 a 100 nanómetros, además se utiliza un agente reductor para convertir los iones metálicos en átomos neutros. También se emplea un agente estabilizante para evitar la agregación de las nanopartículas y mantener su estabilidad. El tamaño, la forma y la morfología de las nanopartículas se pueden controlar variando las concentraciones del reductor, estabilizante o dispersante (Borja-Borja, 2020).

Reducción Fotoquímica y Radiolítica: Uso de luz o radiación para reducir iones metálicos y formar nanopartículas. La fotoquímica es un método ecológico y económico, ya que utiliza la energía solar como fuente de energía. La reducción radiolítica utiliza radiación ionizante (partículas alfa, beta, rayos gamma) para inducir reacciones químicas, aunque la radiación ionizante puede ser peligrosa y requiere medidas de seguridad estrictas.

Síntesis Sol-Gel: Proceso que convierte una solución en una red sólida a través de reacciones de hidrólisis y polimerización. En el cual comúnmente se utilizan compuestos de silicio como el tetraetil ortosilicato (TEOS) o el metiltrimetoxysilano (MTMS). En donde el precursor se hidroliza en presencia de agua para formar un gel, que es una red tridimensional de partículas sólidas

dispersas en un líquido, después el gel se seca a temperaturas que pueden variar entre 100°C y 600°C, dependiendo del material y de las propiedades deseadas.

Síntesis Solvotermal: Método que utiliza solventes a altas temperaturas y presiones para sintetizar nanopartículas. Las temperaturas utilizadas en esta síntesis pueden variar entre 100°C y 600°C, dependiendo del material y de las propiedades deseadas, además se utilizan disolventes orgánicos como amoniaco, hidracina y agua, entre otros. La composición química del precursor es crucial para controlar la forma y las propiedades de los nanocristales resultantes. (Zanella, R. et al., 2014).

## **1.2 Propiedades y aplicaciones de los ionómeros de vidrio**

### **1.2.1 Estructura y composición de los ionómeros de vidrio**

El ionómero de vidrio es un material de restauración dental compuesto por vidrio de silicato y un ácido poliacrílico. Este material es conocido por su capacidad de liberar iones de flúor, lo que ayuda a prevenir caries dentales (Bárcena Rosey, 2006). Se les conoce como cementos ácido-base, debido a que resultan de la reacción entre ácidos poliméricos débiles y vidrios básicos en forma de polvo.

#### **Moléculas presentes en el ionómero de vidrio**

El ionómero de vidrio se divide en dos componentes, primero tenemos al Ácido Acrílico (Poliácido Acrílico el cual contiene grupos carboxílicos (-COOH) que forman puentes de hidrógeno con los iones calcio presentes en la dentina y el esmalte. El segundo componente son los vidrios de Aluminofluorosilicato los cuales contienen iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y fluoruro ( $\text{F}^-$ ) que también participan en la formación de puentes de hidrógeno. Moléculas presentes en la Dentina y el Esmalte

El Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) está presente en la hidroxiapatita del esmalte y en la dentina, forma puentes de hidrógeno con los grupos carboxílicos del ionómero de vidrio. El Fluoruro ( $\text{F}^-$ ) se encuentra presente en la hidroxiapatita del esmalte y en la dentina, también forma puentes de hidrógeno con los grupos carboxílicos del ionómero de vidrio (Proaño de Casalino, D., 2006).

#### **1.2.2 Propiedades fisicoquímicas**

**Adhesión Química:** El ionómero de vidrio se adhiere químicamente a la dentina y al esmalte principalmente a través de la formación de puentes de hidrógeno, proporcionando una unión resistente y duradera (Bárcena Rosey, 2006).

**Biocompatibilidad:** son biocompatibles y de baja toxicidad debido a su composición ya que son vidrios de silicato y polímeros solubles en agua, además liberan iones de fluoruro que ayudan a prevenir caries. Sin embargo, en cuanto a la modificación del ionómero de vidrio se debe de asegurar que no afecte su biocompatibilidad y propiedades mecánicas (Lifeder, 2024). Al ser óxido de calcio se someterían a las pruebas de la norma ISO 10993 para asegurar su compatibilidad y seguridad biológica.

Resistencia a la Compresión: Aunque su resistencia es menor comparada con otros materiales, su flexibilidad y adhesión química lo hacen adecuado para muchas aplicaciones dentales (Blanco Lerech et al., 2017). La magnitud de fuerza de compresión del ionómero de vidrio es medida por MPa, y en la literatura tenemos que los ionómeros de vidrio híbridos tienen una resistencia a la compresión mayor en comparación con los ionómeros de vidrio convencionales, mientras un ionómero de vidrio convencional alcanza los 100-150 MPa el ionómero híbrido tiene una resistencia de 150-220 MPa (Hernández Mata A., 2012).

### **1.2.3 Procesamiento**

Proporción de los reactivos: para un buen procesamiento de ionómero de vidrio, las proporciones que se usan son las siguientes, polvo de vidrio (base) 70% y del ácido poliacrilato un 30% lo que equivale a 0.21 g de partículas de vidrio y 57  $\mu$ l de ácido poliacrílico.

Mezclado y manipulación: Se mezcla una medida específica de polvo de vidrio con una gota de líquido acrílico, cuando se mezcla el polvo de vidrio con el líquido, el ácido poliacrílico se disuelve en agua y libera protones  $H^+$ . Los protones liberados atacan el polvo de vidrio, liberando iones de calcio y aluminio en la solución. Los iones de calcio y aluminio reaccionan con el ácido poliacrílico para formar una matriz de gel polimérico. Se utiliza una espátula plástica para homogeneizar la mezcla durante unos 20-30 seg. La mezcla inicialmente será espesa, pero se volverá menos viscosa a medida que las partículas se disuelvan. En la Figura I-2 se puede observar el diagrama para la obtención del ionómero de vidrio. La capa de cemento no debe exceder 1.5 mm para una adecuada fotopolimerización (García Castellanos B., 2020).

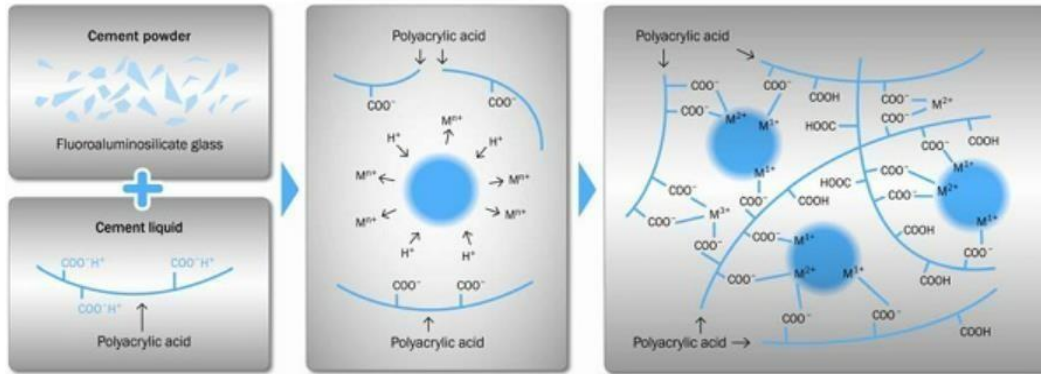


Figura I-3. Diagrama para la obtención de un ionómero de vidrio (Lohbhauer, U. 2009).

Fotopolimerización: la adición de agentes fotopolimerizables puede mejorar la estabilidad y resistencia del material debido a que los ionómeros de vidrio contienen monómeros que se activan con la luz visible, cambiando su estructura a polímeros. La luz LED es comúnmente utilizada en la fotopolimerización debido a su eficiencia y capacidad para emitir luz en el rango adecuado de longitudes de onda generalmente entre 400-500 nm. La matriz de gel polimérico se endurece con el tiempo, formando una estructura rígida y resistente.

#### 1.2.4 Ionómero de vidrio modificado

El ionómero de vidrio es utilizado en diversas aplicaciones, incluyendo restauraciones temporales, obturaciones de cavidades y como cemento para coronas y puentes. No obstante, no es recomendable para restauraciones en áreas de alta carga masticatoria debido a su menor resistencia a la compresión (Cabrera Villalobos et al., 2017).

El ionómero de vidrio modificado consiste en una versión mejorada del ionómero de vidrio común. que se ha trabajado para mejorar distintas propiedades como la resistencia o la durabilidad. Estos materiales suelen tener una menor solubilidad y una mayor resistencia a la compresión.

Se utilizan en restauraciones dentales donde se requiere una mayor durabilidad y estabilidad, como en inlays y onlays. Además, estudios han demostrado que los ionómeros de vidrio modificados con resina, como Vitremer™, tienen una resistencia a la compresión significativamente mayor en comparación con los convencionales (Polet González Cruz, 2022).

Los ionómeros de vidrios modificados han demostrado tener menos grietas y una superficie uniforme después de ser sometidos a procesos químicos (Raisa Severino, 2016).

Existen varias estrategias para modificar los ionómeros de vidrio y mejorar su desempeño en distintas aplicaciones como incorporación de resinas fotopolimerizables debido a que mejoran la resistencia y durabilidad del material, estas resinas permiten una polimerización rápida y eficiente bajo luz LED. La adición de nanopartículas como el ZnO o TiO<sub>2</sub> pueden mejorar las propiedades mecánicas y antibacterianas del ionómero de vidrio. Otra estrategia es la modificación de la microestructura ya que mediante técnicas de procesamiento avanzadas el ionómero de vidrio modificado puede aumentar su resistencia y reducir su solubilidad. La mezcla con otros polímeros como el poliéter metálico, puede mejorar la resistencia del ionómero de vidrio y mejorar su adhesión. Además, tenemos las mezclas de vidrio donde las proporciones típicas de los componentes en el polvo de vidrio pueden variar, pero una composición común es aproximadamente 70-80% de SiO<sub>2</sub>, 10-15% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5-10% de CaO y 1-5% CaF<sub>2</sub>. Las mezclas de vidrio modificadas pueden mostrar una mayor resistencia a la compresión, menor solubilidad y una mejor adhesión a la estructura dental (García Castellanos, B. 2020).

### 1.3 Óxido de calcio (CaO)

#### 1.3.1 Propiedades y estructura del CaO

El CaO es un compuesto químico de gran relevancia en diversas industrias. Su fórmula química es CaO, y se presenta como un sólido blanco cristalino. Con una densidad de  $3.3 \text{ g/cm}^3$  y una masa molar de  $56.1 \text{ g/mol}$ , el CaO posee un punto de fusión elevado de  $2572 \text{ }^\circ\text{C}$  y un punto de ebullición de  $2850 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que refleja su estabilidad térmica.

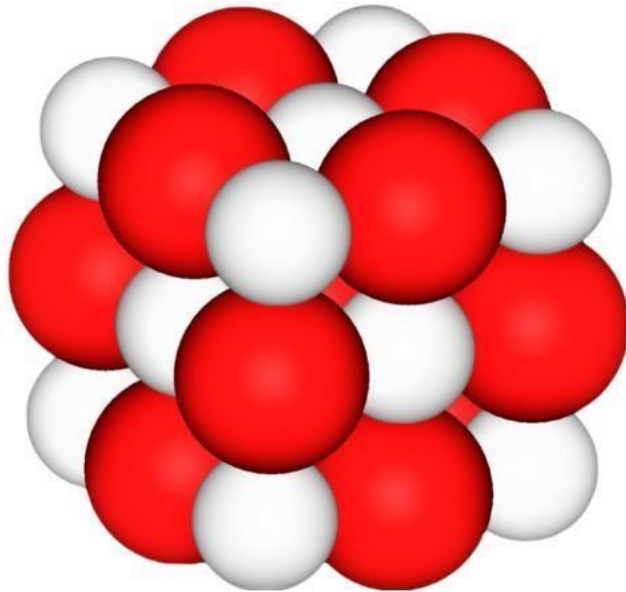


Figura I-4. Estructura del CaO (Briceño V., Gabriela, 2021).

La molécula de CaO tiene una estructura química que contiene un catión de calcio (el cual tiene una carga de +2) y un anión de oxígeno (que tiene una carga de -2). Presenta una estructura cristalina en donde cada ión de  $\text{Ca}^{2+}$  se rodea de seis iones de  $\text{O}^{2-}$  los cuales se encuentran ocluidos dentro de las cavidades octaédricas que quedan en los iones más grandes como se muestra en la figura I-3.

El CaO, conocido como cal viva o cal quemada, ha sido reconocido durante siglos por su versatilidad en diversas aplicaciones industriales y científicas. Sin embargo, en la escala nanométrica, las propiedades del CaO pueden variar significativamente debido a la alta relación área-volumen y a los efectos cuánticos

que surgen en esta dimensión. Esto ha generado un interés creciente en la obtención y  $\text{CaCO}_3$  proveniente de residuos. Es así como residuos, como son las conchas de mar y las cáscaras de huevo, en los cuales se conforma alrededor del 95% de su composición por  $\text{CaCO}_3$ . Su poco aprovechamiento puede tener un beneficio para la sociedad, sumado a un desarrollo económico en el sector industrial si son tenidos en cuenta como fuente de obtención de  $\text{CaCO}_3$ . El  $\text{CaCO}_3$  ampliamente presente en la naturaleza en forma de minerales como la calcita y la aragonita, es un precursor natural del  $\text{CaO}$ .

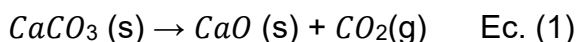
Aprovechando esta transformación, los investigadores han comenzado a explorar las propiedades y aplicaciones de las nanopartículas de  $\text{CaO}$  derivadas del  $\text{CaCO}_3$  (Ruiz, 2011). Este enfoque no solo ofrece una perspectiva novedosa en la obtención de materiales, sino que también promete revelar propiedades emergentes en el ámbito nanométrico.

### **1.3.2 Método de síntesis**

La calcinación, consiste en calentar carbonato de calcio a altas temperaturas para producir  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$ .

El  $\text{CaO}$  se sintetiza principalmente mediante la descomposición térmica del  $\text{CaCO}_3$  un proceso conocido como calcinación.

Esta reacción está representada por la ecuación:



La calcinación normalmente se realiza en hornos a temperaturas elevadas, generalmente superiores a  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , para asegurar la descomposición completa del  $\text{CaCO}_3$  y la formación de  $\text{CaO}$  (Roberto C., 2011).

El método de precipitación implica que precipite hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a partir de una solución acuosa que contiene iones de calcio e hidróxido. El precipitado se calcina para obtener  $\text{CaO}$ .

El método de pechini se utilizan precursores de  $\text{Ca}$  y un agente quelante para hacer una solución que se calcina a  $900^\circ$ , este método permite controlar la microestructura y las propiedades del  $\text{CaO}$  (R-Joya, 2016).

### 1.3.3 Mecanismo de reactividad

La alta reactividad del CaO se debe a su fuerte carácter básico. Cuando se expone a la humedad, reacciona fácilmente con el agua para formar  $\text{Ca(OH)}_2$  incrementando la temperatura con respecto al tiempo. Esta propiedad es importante en distintos procesos, especialmente en aquellos que requieren de hidratación, donde es deseable sea reactiva. El control de la reactividad se obtiene por medio del control de las condiciones de la calcinación, entre más alta la temperatura hasta aproximadamente  $1200^\circ\text{C}$  de calcinación y más largo el tiempo de 3-5 h de permanencia a esa temperatura, más baja es la reactividad del producto debido a la formación de partículas más grandes y menos superficie específica. La posibilidad de controlar la reactividad depende del tipo de horno y las características de la piedra. La reactividad se mide generalmente con una prueba de hidratación donde una muestra se disuelve en agua y se mide el incremento de temperatura en función del tiempo.

Existen otros compuestos como el  $\text{Ca(OH)}_2$  donde las propiedades biológicas y antibacterianas que tienen son debido a la disociación de calcio e iones hidroxilo, los cuales pueden llevar a una inactivación reversible o irreversible de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos Gram positivos y Gram negativos (Brito Fermín et al., 2016).

Las partículas de óxidos metálicos más extensamente estudiadas son el ZnO, MgO y  $\text{TiO}_2$ , pero tienen la desventaja de presentar toxicidad selectiva, que dependen de los sistemas biológicos en los cuales sean aplicadas.

Las partículas de CaO han recibido una considerable atención por sus inusuales propiedades. existe una gran controversia sobre su mecanismo antibacteriano, pero se les atribuye a cuatro posibles mecanismos (Yajaira et al., 2019).

**Daño a la membrana celular:** Las partículas de CaO pueden interactuar con las membranas celulares de bacterias y otros microorganismos. Esto puede provocar daño estructural en las membranas, alterando su permeabilidad permitiendo la entrada de iones y moléculas que normalmente no lo harían.

Generación de especies reactivas de oxígeno (ROS): Las partículas de CaO pueden generar especies reactivas de oxígeno (ROS), como el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Las ROS pueden dañar las proteínas, lípidos y ácidos nucleicos en las células microbianas, lo que afecta su viabilidad. Además, el CaO puede actuar como un antioxidante neutralizando radicales libres y otras ROS mediante la transferencia de electrones (Carvajal, Carlos., 2019).

Alteración del pH intracelular: Las partículas de CaO pueden ingresar a las células microbianas y aumentar el pH intracelular. Esto puede afectar negativamente las funciones celulares y, en última instancia, inhibir el crecimiento y la reproducción de los microorganismos. El CaO puede reaccionar con los ácidos orgánicos presentes en las células microbianas, neutralizándolos y aumentando el pH intracelular, además la reacción del CaO con el  $\text{CO}_2$  presente en las células puede formar bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), lo que también contribuye a elevar el pH intracelular (Arrieta, J. 2004).

Interacción con enzimas y proteínas: Las partículas de CaO pueden unirse a enzimas y proteínas dentro de las células microbianas. Esto puede afectar la actividad enzimática y la función proteica, lo que contribuye al efecto antimicrobiano (Vázquez Olmos et al., 2018).

Obteniendo así las propiedades para contener el crecimiento de las bacterias, esto también puede ser asociado por su ionización, con liberación de iones hidroxilo y aumento del pH, y así inhibiendo su crecimiento.

#### **1.3.4 Aplicaciones de las partículas de CaO**

La manipulación de los parámetros del proceso de calcinación puede conducir a la obtención de nanopartículas con tamaños y propiedades específicas, lo que a su vez abre la puerta a aplicaciones innovadoras en campos como la medicina, la catálisis, la energía y la purificación ambiental (Kumari et al., 2024). Actualmente, hay estudios que han demostrado que el CaO posee grandes propiedades bactericidas y antiinflamatorias comúnmente es utilizado en el tratamiento de agua, En un estudio, la combinación de CaO con omeprazol al 10% tuvo un porcentaje de inhibición del 87.7% frente a *Enterococcus faecalis*. A concentraciones más bajas (1%, 5%, 8%), los porcentajes de inhibición fueron

64.1%, 67.8% y 71.9%, respectivamente además clínicamente como cemento para la fijación de prótesis al hueso debido a sus propiedades biocompatibles y su capacidad para promover la osteointegración. Estudios han demostrado que el uso de cementos basados en CaO puede mejorar significativamente la osteointegración, promoviendo la regeneración ósea alrededor de la prótesis (Alvear Pérez, Javier, 2018). En base a lo anterior, este tipo de compuesto se ha catalogado como un material biocompatible esto a partir de estudios realizados en cultivos celulares han demostrado que el CaO no causa citotoxicidad significativa en las células humanas. Esto indica que no es tóxico para las células y puede ser utilizado en aplicaciones biomédicas. En estudios con animales, el CaO ha mostrado una buena integración con los tejidos óseos sin causar inflamación o reacciones adversas. Esto sugiere que es seguro para su uso en aplicaciones clínicas. Además, su capacidad para liberar iones de calcio es buena para la regeneración ósea. La biocompatibilidad del óxido de calcio se ha demostrado a través de estudios in vitro e in vivo, así como su uso clínico en aplicaciones biomédicas. Su capacidad para integrarse con los tejidos óseos y su estabilidad química lo convierten en un material adecuado para aplicaciones médicas (Alejandro Álvarez Rodríguez, 2017).

Una de las áreas de principal interés es la obtención y manipulación de nanopartículas de CaO a partir del  $\text{CaCO}_3$  como un proceso que promete desbloquear nuevas perspectivas en la nanociencia y la nanotecnología.

La historia de las nanopartículas de CaO es un viaje de exploración científica que ha abarcado varias décadas y se ha desarrollado de avances en diversas disciplinas (Elizabeth Rodil Posada et al., 2016).

Durante los primeros años de la década de 2000, los esfuerzos se centraron en el desarrollo de métodos de síntesis reproducibles y controlables para obtener nanopartículas de CaO. La calcinación del  $\text{CaCO}_3$ , presente en fuentes naturales como minerales y cáscaras de huevo, surgió como una vía atractiva. Investigadores exploraron la influencia de la temperatura, la atmósfera y el tiempo de calcinación en las propiedades de las nanopartículas resultantes (Balandrán Quintana & Mendoza Wilson, 2021).

En la década de 2010, la atención se desplazó hacia las aplicaciones potenciales de las nanopartículas de CaO. Investigaciones multidisciplinarias revelaron que las propiedades únicas de las nanopartículas podrían aprovecharse en campos como la catálisis heterogénea, la liberación controlada de fármacos, la remoción de contaminantes y la terapia fotodinámica. Estos hallazgos abrieron un abanico de posibilidades para abordar desafíos en campos tan diversos como la energía, la medicina y el medio ambiente (Luis et al., 2011).

Hoy en día, los avances en tecnología y ciencia de materiales continúan expandiendo el campo de las nanopartículas de CaO. La síntesis controlada se ha refinado aún más, permitiendo la obtención de nanopartículas con tamaños y morfologías específicas.

Las partículas de CaO tienen diversas aplicaciones en la ingeniería de materiales como estas:

**Sensores electroquímicos:** Las partículas y nanopartículas de CaO poseen propiedades únicas, como un mayor área superficial y actividad catalítica. Esto las hace ideal para aplicaciones en sensores electroquímicos, en el que se busca alta sensibilidad y selectividad en la detección de sustancias. Existen los sensores a partir de oro y de platino que suelen tener una sensibilidad similar o ligeramente superior a los de CaO sin embargo sus costos son elevados. (Baeza, Alejandro, 2005).

**Membranas porosas:** Son membranas que se utilizan como soporte para la síntesis de otros materiales. Además, se emplean como capas internas dieléctricas en capacitadores de alta capacitancia, así como en sensores y actuadores.

Las partículas de CaO desempeñan un papel importante en la ingeniería de materiales, contribuyendo a la mejora de dispositivos y sistemas en diversas aplicaciones.

Las nanopartículas de CaO pueden formar parte de pastas dentales y geles desensibilizantes. Su capacidad para bloquear los túbulos dentinales expuestos y reducir la transmisión de estímulos nocivos puede contribuir a reducir la sensibilidad dental, un problema común en pacientes con erosión dental o retracción de encías.

Las aplicaciones odontológicas de las partículas de CaO presentan grandes oportunidades para abordar desafíos clínicos y mejorar la salud bucal. A medida que la investigación en este campo avanza, es probable que surjan nuevas aplicaciones y enfoques que amplíen aún más el potencial de estas nanoestructuras en el campo de la odontología.

La exploración de aplicaciones interdisciplinarias se mantiene en constante evolución, y las propiedades emergentes a nano escala siguen sorprendiendo a la comunidad científica (Elizabeth Rodil Posada et al., 2016).

#### **1.4 Interacción entre compuestos antimicrobianos y microorganismos orales**

Materiales dentales con efecto antibacterial: Se ha documentado que las principales enfermedades relacionadas con el microbioma bucal son la caries y la periodontitis demostrando ser un principal problema en la salud humana (Tu et al., 2023a) En la boca, la saliva contiene diversas proteínas y otras moléculas que pueden adherirse a las superficies dentales y de implantes, formando una capa inicialmente delgada que luego se espesa con el tiempo (Hao et al., 2018). Esta capa, conocida como película adquirida, puede facilitar la adhesión y proliferación bacteriana (Bowen, 2016). La composición y estructura de esta película pueden variar según el material dental utilizado, lo que sugiere la necesidad de investigar más sobre cómo influyen estos materiales en la formación de la película y sus efectos en la salud oral.

Por otra parte, se ha observado que tipos de *Streptococcus* orales como *Streptococcus mutans* y *Streptococcus sanguis* tienen la capacidad de establecerse en la superficie de la película previamente mencionada (Tu et al., 2023b). *Streptococcus mutans* es considerado el principal agente microbiano asociado con la formación de caries dental, dado que se adhiere al esmalte dental mediante interacciones con las proteínas presentes en la película adquirida y con adhesinas en su superficie celular.

El uso de materiales dentales en procedimientos odontológicos puede tener un impacto en el microbiota oral, lo que a su vez puede influir en la salud bucal del paciente.

Algunos materiales dentales, como las restauraciones de amalgama de plata, pueden actuar como reservorios de bacterias si no se sellan adecuadamente o si presentan desgaste con el tiempo (Shenoy, 2008). Esto puede afectar la composición del microbiota oral en el área donde se encuentra el material. En casos raros, algunos pacientes pueden experimentar reacciones alérgicas o de hipersensibilidad a ciertos materiales dentales, lo que puede desencadenar inflamación en la boca.

La elección de un biomaterial bucal específico depende de la aplicación clínica y las necesidades del paciente, así como de consideraciones estéticas, funcionales y de biocompatibilidad (Luis et al., 2012).

Los avances en la investigación y desarrollo de biomateriales bucales continúan mejorando la calidad de la atención dental y la experiencia del paciente.

#### **1.4.1 Características de *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans***

##### ***Enterococcus faecalis***

Morfología: Es un coco Gram positivo, catalasa negativo y no móvil, puede aparecer solo, en pares o en cadenas cortas tienen un tamaño de 0.6-2.0 x 0.6-2.5  $\mu\text{m}$ .

Metabolismo: Es un microorganismo anaerobio facultativo que puede crecer en presencia o ausencia de oxígeno. Su crecimiento óptimo ocurre a 35°C, aunque puede crecer entre 10°C y 45°C. Fermenta glucosa y otros carbohidratos produciendo ácido láctico como producto final. Puede tolerar concentraciones de 6.5% de NaCl, pH de 9.6 y temperaturas de 60°C durante 30 minutos. (Prashant, Dahal, 2023)

Resistencia en Ambientes Bucales: *Enterococcus. faecalis* es resistente a cambios de pH, lo que le permite sobrevivir en ambientes ácidos y alcalinos. También puede formar biopelículas, lo que le ayuda a adherirse a superficies y resistir condiciones adversas. Produce una citolisina con acción citotóxica frente a ciertas células eucariotas y hemolisina frente a eritrocitos.

##### ***Streptococcus mutans***

Morfología: Es un coco Gram positivo que forma parte del microbiota oral. Son células esféricas con un diámetro de aproximadamente 0.5 -1.0  $\mu\text{m}$ . se encuentra en cadenas cortas o pares, pero no forman esporas, no presentan flagelos por lo cual no son móviles.

Metabolismo: se trata de un anaerobio facultativo por lo cual requiere del 5-10% de CO<sub>2</sub> para crecer. Produce glucanos y ácido a partir de la sacarosa, contribuyendo a la desmineralización del esmalte dental y la formación de caries.

Resistencia en Ambientes Bucales: El *Streptococcus mutans* tiene varias adaptaciones que le permiten resistir los ambientes bucales y mantener su

supervivencia. La estabilidad estructural del biofilm y la proximidad entre las células bacterianas facilitan la transferencia genética, lo que puede llevar a la adquisición de genes de resistencia a los antibióticos. Además, puede mantener la homeostasis del pH interno a pesar de las condiciones ácidas externas, gracias a bombas de protones y sistemas de transporte acidúricos robustos (Rodríguez, M. J., 2022).

#### **1.4.2 Evaluación microbiológica de materiales antimicrobianos**

La evaluación microbiológica de materiales antimicrobianos implica varios métodos de prueba para determinar su eficacia., entre ellos tenemos la Difusión de Agar donde Se coloca un disco impregnado con el material antimicrobiano sobre una placa de agar inoculada con la bacteria de interés. Después de incubar, se mide el área de inhibición alrededor del disco. Se calcula el diámetro de la zona de inhibición (ZDI) en milímetros. Un diámetro mayor indica una mayor eficacia antimicrobiana. La concentración mínima inhibitoria (CMI) consiste en preparar diluciones seriadas del material antimicrobiano en un medio de cultivo y se inocula con la bacteria. Se determina la concentración más baja que inhibe el crecimiento visible de la bacteria. La CMI se expresa en  $\mu\text{g/mL}$  o  $\text{mg/L}$ . Una CMI más baja indica una mayor eficacia del material antimicrobiano. Mientras en las pruebas de inhibición en Biofilms consisten en formar biofilms de la bacteria en un soporte adecuado y se aplica el material antimicrobiano. Se evalúa la capacidad del material para inhibir el crecimiento del biofilm. Se mide la reducción del área del biofilm o la cantidad de células viables después de la aplicación del material. Se puede utilizar microscopía o técnicas de fluorescencia para cuantificar los resultados (AINIA., 2014).

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Obtener y caracterizar compósitos de ionómero de vidrio modificados con partículas de CaO y evaluar su efectividad microbiológica contra *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans*.

### Objetivos particulares

Sintetizar partículas de CaO a través de una calcinación eficiente del CaCO<sub>3</sub> de cascara de huevo.

Formular un compósito de CaO con ionómero de vidrio comercial, en proporciones en 0, 15, 20 y 25 % en peso de CaO.

Determinar la concentración mínima inhibitoria de las partículas de CaO y evaluar el efecto antimicrobiano de los compósitos formulados contra *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans* mediante pruebas microbiológicas.

Caracterizar la morfología y microestructura de las muestras obtenidas utilizando técnicas avanzadas como microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía óptica, difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

## CAPITULO II. METODOLOGÍA

### Metodología general

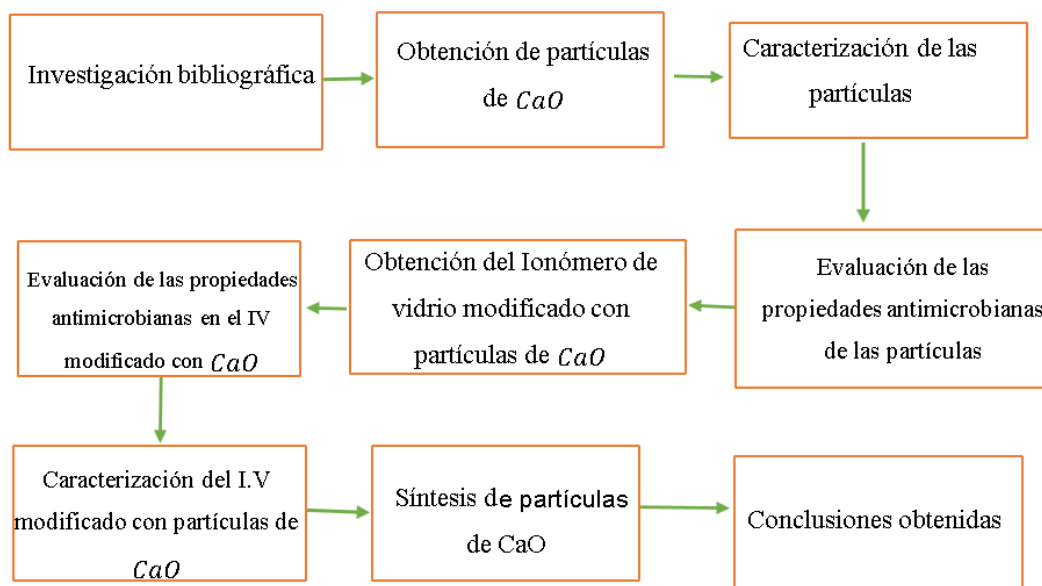


Figura II-1. Diagrama de flujo.

En la metodología como se muestra en la figura II-1 abarco diferentes pasos comenzando con la investigación bibliográfica en la cual se recopiló información del tema en artículos científicos, revistas científicas, libros. El método que se usó para la síntesis de partículas de CaO parte de limpieza, trituración de la materia prima y una calcinación por medio de un proceso por microondas. Se procedió a evaluar las propiedades antimicrobianas de las partículas de CaO por medio de una prueba llamada microdilución en caldo.

Posteriormente se procedió a elaborar las probetas de un ionómero de vidrio comercial, estas echas con distintos porcentajes de partículas de CaO, siguiendo las condiciones del fabricante. El siguiente paso consistió en evaluar la actividad antimicrobiana en las probetas modificadas con las partículas de CaO.

#### **Materiales:**

Se obtuvo el  $\text{CaCO}_3$  de cascarones de huevo. Se utilizó ionómero de vidrio de la marca Prime Dental, light-Cured Universal restorative. Para las pruebas biológicas, se usó un medio de cultivo de la marca BD Bioxon, además cepas de

*Streptococcus mutans* ATCC 25175 y *Enterococcus faecalis* ATCC 29212, así como resazurina de la marca SIGMA.

## **2.1 Obtención de las partículas de CaO**

1.- los cascarones de huevo pasaron por varios procesos de limpieza.

1.1 comenzando con un lavado manual para quitar materia orgánica.

1.2 los cascarones de huevo se sumergieron en un vaso de precipitado de 1000 ml con 700 ml de agua destilada y 10 ml de cloro.

1.3. Se utilizó un agitador magnético para agitar la mezcla a 500 rpm durante 10 minutos.

1.4 se realizó otro lavado con jabón y una agitación de 500 rpm durante 10 minutos.

1.5 se repitió el proceso de lavado con 700 ml de agua destilada a 500 rpm durante 10 minutos.

2.- Al terminar el proceso se dejó secar a temperatura ambiente durante 48 horas en un lugar seco.

3.- los cascarones se metieron a una estufa durante 2 horas a una temperatura de 100°C y se almacenaron (Kasirajan et al., 2022).

4.- Se aplicó una disminución de tamaño.

4.1 primero por medio de un molino de bolas de la marca U.S STONEWARE durante 24 horas a una velocidad de 300 rpm.

4.2 las partículas obtenidas se tamizaron por una malla 325 hasta tener 20 g.

### *Proceso de calcinación*

Se utilizó una capsula de fibra cerámica con un recubrimiento de carburo de silicio, este equipo permitió llegar más rápido a temperaturas de calcinación, debido a que cuando las microondas entran en contacto con el recubrimiento de carburo de silicio incrementa muy rápido su temperatura. El horno de microondas marca Panasonic y modelo NN-SD9825 sensor de 1200W y 10 niveles de potencia. En muestras de 2 g, se evaluaron los siguientes parámetros:

Potencia del microondas	Tiempo en minutos
5	9
4	12
4	16

Tabla II-1. Tabla de parámetros para la calcinación.

Posterior al proceso de calcinación se dejó enfriar la capsula por 1 hora como se ve en la figura II-2, la muestra se resguardado en un frasco hermético para su posterior análisis.

La implementación de tecnología de microondas en los procedimientos de incineración ha demostrado ser una mejora significativa en el control de calidad interno, así como en los métodos de preparación de muestras en ciertos casos. Existe el sistema PYRO de Milestone para calcinación en mufla por microondas proporciona una alternativa a las técnicas tradicionales de hornos de mufla. Esta solución ha permitido a los laboratorios optimizar procesos como la determinación de residuos en ignición y la pérdida por calcinación (LOI) en diversas industrias, mejorando así su eficiencia (Milestone, 2025).



Figura II-2. Capsula de fibra cerámica con recubrimiento de carburo de silicio.

## 2.2 Obtención de ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO

Se usaron diferentes concentraciones de partículas de CaO para mezclar con las partículas de vidrio (Moya et al., 2011). Se trabajo con tres porcentajes de 15%, 20% y 25% sobre un total de 21 g, lo cual es lo que se aplica comúnmente en este

ionómero de vidrio. Se pesó en una balanza analítica el 15% de nanopartículas de CaO y el resto con partículas de vidrio de la marca Gold Label light-Cured, hasta alcanzar el peso de 21 g. Se mezcló muy bien en un papel cera.

1.-Se agregaron dos gotas de ácido poliacrílico para formar el ionómero de vidrio.

2.-La mezcla se realiza primero con la mitad del contenido durante 10-15 segundos.

3.-Se agregan los polvos de ionómero de vidrio con las partículas faltantes a la mezcla.

4.-No se debe exceder un tiempo de 25 segundos para evitar que la mezcla se seque y no se una al material restante.

5.-se colocó en un perfil de metal con un tamaño de 10 mm de diámetro y 3 mm de profundidad.

6.-Se colocaron tiras de papel celulosa por debajo del perfil y se introdujo la mezcla en el perfil.

7.-Una vez la mezcla se encontró en el perfil, se colocó otro papel de celulosa por encima.

8.-Posteriormente, se utilizó una lámpara de fotocurado blue phase N de la marca VIVADENT. Como se ve en la figura II-3 b) con la potencia en High, la cual irradia a 500 nm, durante 20 segundos por cada lado.

9.-Terminando, se retiró el material del perfil y se almacenó en un lugar fresco y seco. Este procedimiento se siguió como se muestra en la tabla II-2.

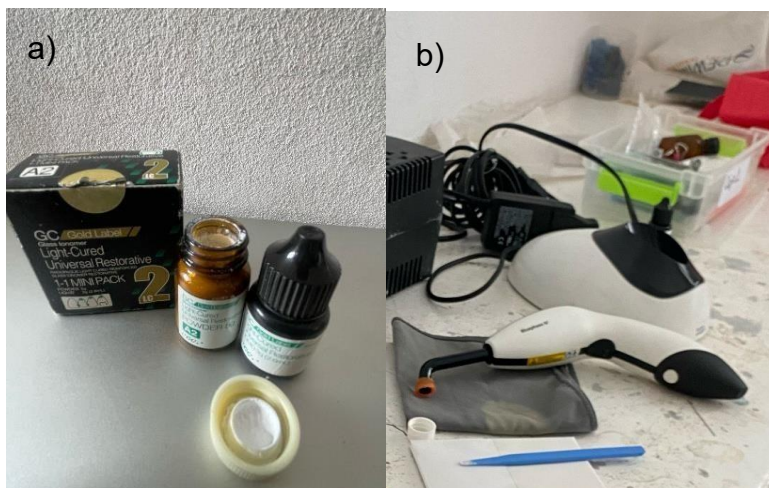


Figura II-3. a) Partículas de vidrio y ácido poliacrílico, que conforman el ionómero de vidrio. b) lámpara de foto curado blue phase N de la marca VIVADENT.

Instrucciones	parámetros
Tiempo de mezcla (seg.)	20"-25"
Tiempo de trabajo (min., seg.)	3'45"
Tiempo de foto-curado(seg.)	20"
Profundidad del curado (A2)(mm)	1,8

Tabla II-2. Condiciones para trabajar el ionómero de vidrio según el fabricante.

### 2.3 Evaluación de las propiedades antimicrobianas de las partículas

1.-Se pesaron 100 mg de partículas de CaO en una balanza de precisión para preparar la solución stock.

-Esta solución se usó como base para las pruebas.

-Se realizó esta operación dentro de una campana de flujo laminar marca VICHY modelo CFL103.

2.-Se prepararon medios de cultivo TSA (agar, soja, tripticaseína) en cajas Petri en la campana de flujo laminar.

-Se realizó un resembra de las cepas en diferentes cajas Petri.

-Las cepas bacterianas se incubaron a 37°C durante 24 horas para obtener cultivos de células viables.

3.-Posteriormente, se preparó medio líquido TSB (caldo, soja, tripticaseína) para el pre-inóculo de las bacterias.

-Este medio se incubó durante 3 horas.

4.-Luego, se midió la absorbancia utilizando un espectrofotómetro UV-Vis. - Este dato permitió determinar el volumen necesario para inocular 500,000 células basado en la densidad óptica (OD). Se utilizó la “Calculadora de concentración de cultivo celular” de Agilent para obtener los respectivos datos.

5.-Se utilizaron placas de Elisa de 96 pozos para el análisis de microdilución en caldo.

-El análisis se realizó agregando medio de cultivo, microorganismo, partículas de CaO en 15 ml, 20 ml y 25 ml, y como indicador de viabilidad se añadió resazurina. Como se muestra en la figura II.4.

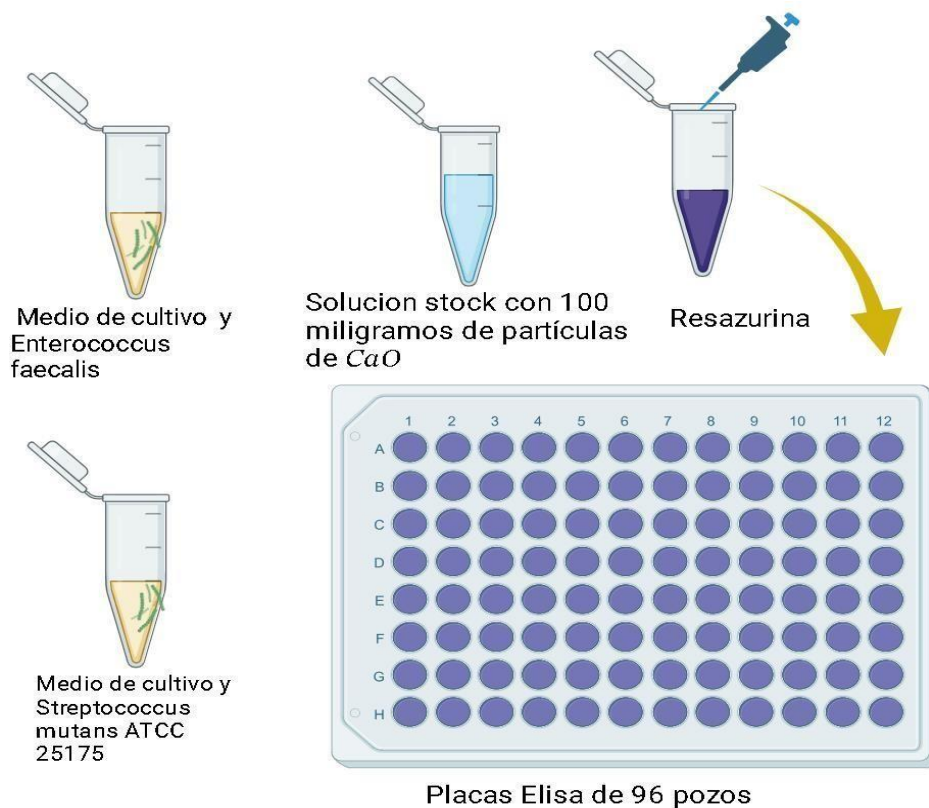


Figura II-4. Procedimiento para determinar las propiedades antibacteriales de las partículas de CaO.

-Las placas se incubaron durante 24 horas a 37°C.

6.-Finalmente, se evaluó la actividad inhibitoria de las partículas sobre los microorganismos.

-La resazurina, como se mencionó previamente, es un indicador basado en una reacción de óxido-reducción.

-Este reactivo indica si las partículas tienen actividad inhibitoria contra las bacterias. -Lo cual se considera un parámetro cualitativo, ya que el viraje de azul a rosa indica la respiración de la bacteria, argumentando que esta es viable y que las partículas en cierta concentración no tienen actividad inhibitoria.

7.-Este procedimiento se aplicó a dos bacterias específicas que se encuentran en los dientes: *Streptococcus mutans* ATCC 25175 y *Enterococcus faecalis*.

#### **2.4 Evaluación de las propiedades antimicrobianas en el ionómero de vidrio modificado con CaO**

La evaluación se realizó por la técnica de difusión en agar. Se preparó un preinoculo en caldo TSB de cada cepa a evaluar. Posteriormente, se inocularon de 3 horas a 37 °C. Se realizó una lectura en espectrofotómetro UV-Vis para determinar el volumen de inoculación. Se tomaron cajas Petri con medio de cultivo TSA (agar, soja, tripticaseína) en la campana de flujo laminar y se hizo una siembra por estría masiva con ayuda de un asa de T.

Posteriormente se colocaron las pastillas con el ionómero de vidrio modificado con las partículas de CaO, en porcentajes del 15 % 20 % y 25 %. Las cepas se incubaron a 37°C durante 24 horas. Finalmente se midió el tamaño del halo de inhibición que presentó cada pastilla.

#### **2.5 Técnicas de caracterización**

1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Marca: JEOL

Modelo: JSM-6610LV

Parámetros: amplificación x500, 20 KeV

2. Difracción de Rayos X (DRX)

Marca: Bruker

Modelo: D8 DISCOVER Parámetros:

Intervalo de escaneo en  $2\theta$ : 5-80°

Tiempo de escaneo :0.3 seg

Tamaño de paso: 0.04°

### 3. Microscopio Óptico

Marca: Karl Zeiss

Modelo: Scope A1

Parámetros: resolución 50X

### 4. Espectroscopia en el infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Modelo: Vertex 70

Modo utilizado: ATR

## CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Obtención de partículas de CaO

Tras obtener los cascarones de huevo completamente limpios como se muestra en la figura III-1 a) se procesaron en el molino de bolas, obteniendo un total de 100 g de  $\text{CaCO}_3$  se obtuvo un polvo fino y blanco como se muestra en la figura III-1 b).



Figura III-1. a) Cascarones de huevo limpios, b) reducción del tamaño de partícula de  $\text{CaCO}_3$  por medio del molino de bolas y c) tamizado con malla 325.

Este material pasó por un proceso adicional de tamizado utilizando una malla 325 como se muestra en la figura III-1 c).

La reducción del tamaño de las partículas es esencial para mejorar la eficiencia en la calcinación, ya que aumenta la superficie de contacto y facilita reacciones más homogéneas (M. M., & Sporyk, D. F., 2017).

El proceso de calcinación de  $\text{CaCO}_3$  en una capsula de fibra cerámica implica calentar la muestra a una temperatura alta para eliminar cualquier componente volátil y obtener el CaO puro.

Importancia del tiempo de enfriamiento y almacenamiento:

Es esencial permitir que la muestra se enfríe adecuadamente después de la calcinación para evitar cualquier reacción adicional que pueda alterar los resultados del análisis. Un enfriamiento rápido puede causar tensiones térmicas y fracturas en la muestra.

Almacenamiento: Las muestras calcinadas deben almacenarse en un lugar fresco y seco para evitar la absorción de humedad y otros contaminantes que puedan afectar la pureza del CaO.

Calcinación por mufla convencional: Este método se basa en un calentamiento gradual de la muestra en un horno cerrado. Generalmente se emplean rampas de calentamiento lentas de 5 a 10 °C/min hasta alcanzar temperaturas elevadas, habitualmente en el rango de 700 a 900 °C, las cuales se mantienen durante varias horas (por ejemplo, 2 a 6 horas) para asegurar la transformación completa del precursor CaCO<sub>3</sub> en CaO. La prolongada exposición a altas temperaturas favorece la cristalización completa, aunque también incrementa el riesgo de sinterización o aglomeración de las nanopartículas, lo que puede reducir el área superficial activa y afectar su reactividad.

Calcinación por microondas: el calentamiento por microondas induce un calentamiento volumétrico en la muestra mediante la absorción directa de la energía electromagnética. Esto permite alcanzar la temperatura deseada en tiempos mucho más cortos en el orden de 10 a 30 minutos y, en muchos casos, a temperaturas “efectivas” menores en el rango de 500 a 700 °C. La rápida absorción de la energía genera una nucleación inmediata y un crecimiento controlado, lo que minimiza la exposición prolongada al calor y, por tanto, reduce significativamente la sinterización y la coalescencia de las partículas.

En la figura III-2 a) se observa cómo queda la muestra siguiendo los parámetros de 9 minutos de tiempo con una potencia de 5. La tonalidad negra visible se debe a las impurezas y otros componentes presentes en la cáscara de huevo, como restos de materia orgánica. Esta coloración no coincide con las del CaO que es blanca completamente. Estos elementos indeseados pueden ser malos para la pureza del producto final.

A lo largo del proceso, se cuidó constantemente la evolución del material para asegurar que se alcanzara la coloración deseada.

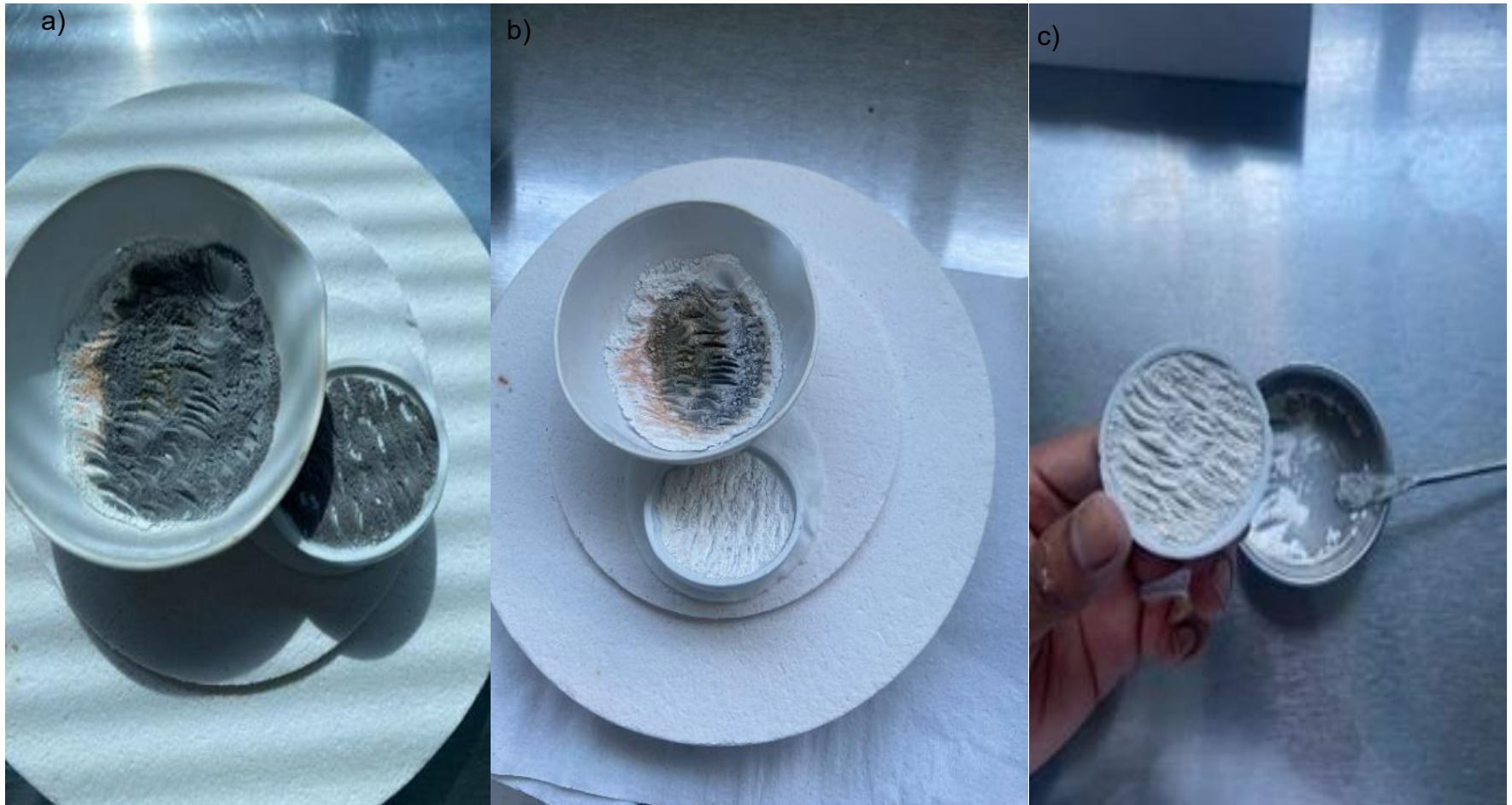


Figura III-2. Muestras calcinadas: (a) Tiempo de 9 minutos y potencia de 5, (b) tiempo de 16 minutos y potencia de 4, (c) tiempo de 12 minutos y potencia de 4.

Para la muestra la figura III-2 b) se usaron los parámetros de 4 de potencia y 16 minutos, el material obtenido se aprecia en una diferente coloración. Este método permitió observar diferencias en las muestras obtenidas con los parámetros de tiempo y potencia, así como afecta la distribución del material.

Se analizó la muestra de la figura III-2 b) la cual se encontraba en una menor proporción y mejor distribuida en el recipiente refractario. Esta muestra logró una coloración completamente blanca lo que sugiere una temperatura y distribución óptima de calcinación, obteniendo los parámetros necesarios para la calcinación a través del horno de microondas.

La distribución uniforme del material en el recipiente favoreció una calcinación más eficiente y homogénea.

Por otro lado, la muestra de la figura III-2 b) que se encontraba en mayor proporción, aún presentaba diversos componentes. Esto sugiere que la mayor cantidad de material en el recipiente dificultó una calcinación completa y uniforme, impidiendo la transformación total de otros compuestos.

En la figura III-2 c) se acomodó la muestra uniformemente para así tener una calcinación homogénea y rápida a partir de los anteriores resultados.

Se proceso, repitiendo detenidamente los parámetros evaluados previamente, con el fin de establecer un método confiable y reproducible para la obtención de partículas de CaO.



Figura III-3. Calcinación de las partículas de  $\text{CaCO}_3$  en microondas.

En la figura III-3 se muestra la evidencia de la muestra colocada correctamente en el horno de microondas. Se cuidó que la distribución de la muestra

en la capsula de fibra cerámica estuviera uniforme para asegurar una calcinación efectiva.

Este método permitió una calcinación rápida y homogénea del material donde se reduce hasta en un 85% el tiempo de calcinación en comparación con un proceso de mufla (Rodríguez-Navarro, C., 2009)

### **3.1.1 Difracción de rayos X.**

La técnica DRX aporó datos cruciales en la composición y las fases presentes en la muestra, para obtener un producto de alta pureza y calidad.

El difractograma de la figura III-4 con los parámetros de 5 potencia y 9 min, en análisis 1 muestra de los ángulos en el eje  $2\theta$  correspondientes a los planos de difracción y fases presentes, El pico de mayor intensidad en  $34^\circ$  en eje  $2\theta$  correspondiente a la fase  $\text{Ca(OH)}_2$  presenta mayor intensidad en comparación con el pico en  $38^\circ$  de la fase  $\text{CaO}$  por lo tanto los parámetros de potencia y tiempo se ajustaron para alcanzar una temperatura más alta para completar el cambio de fase. El ajuste de los parámetros de calcinación es crucial para obtener  $\text{CaO}$  de alta pureza de acuerdo con los datos generados por la técnica de Difracción de Rayos.

En el difractograma de la muestra de 4 de potencia y 16 min, el pico de mayor intensidad se encuentra en  $34^\circ$  en eje  $2\theta$  y que corresponde a la fase  $\text{Ca(OH)}_2$  así que se tuvo que ajustar aún más los parámetros y así como también la distribución de la muestra.

En el difractograma de la muestra con los parámetros de 4 de potencia y 12 minutos, en el análisis 3, el pico de mayor intensidad se encuentra en  $37^\circ$  en el eje  $2\theta$  corresponden al  $\text{CaO}$ .

Por otro lado, el difractograma de la muestra, en el análisis 4 que se encontraba en mayor proporción, aún presentaba trazas de diversos componentes indeseados. Esto sugiere que la mayor cantidad de material en el recipiente dificultó una calcinación completa y uniforme, impidiendo la eliminación total de las impurezas.

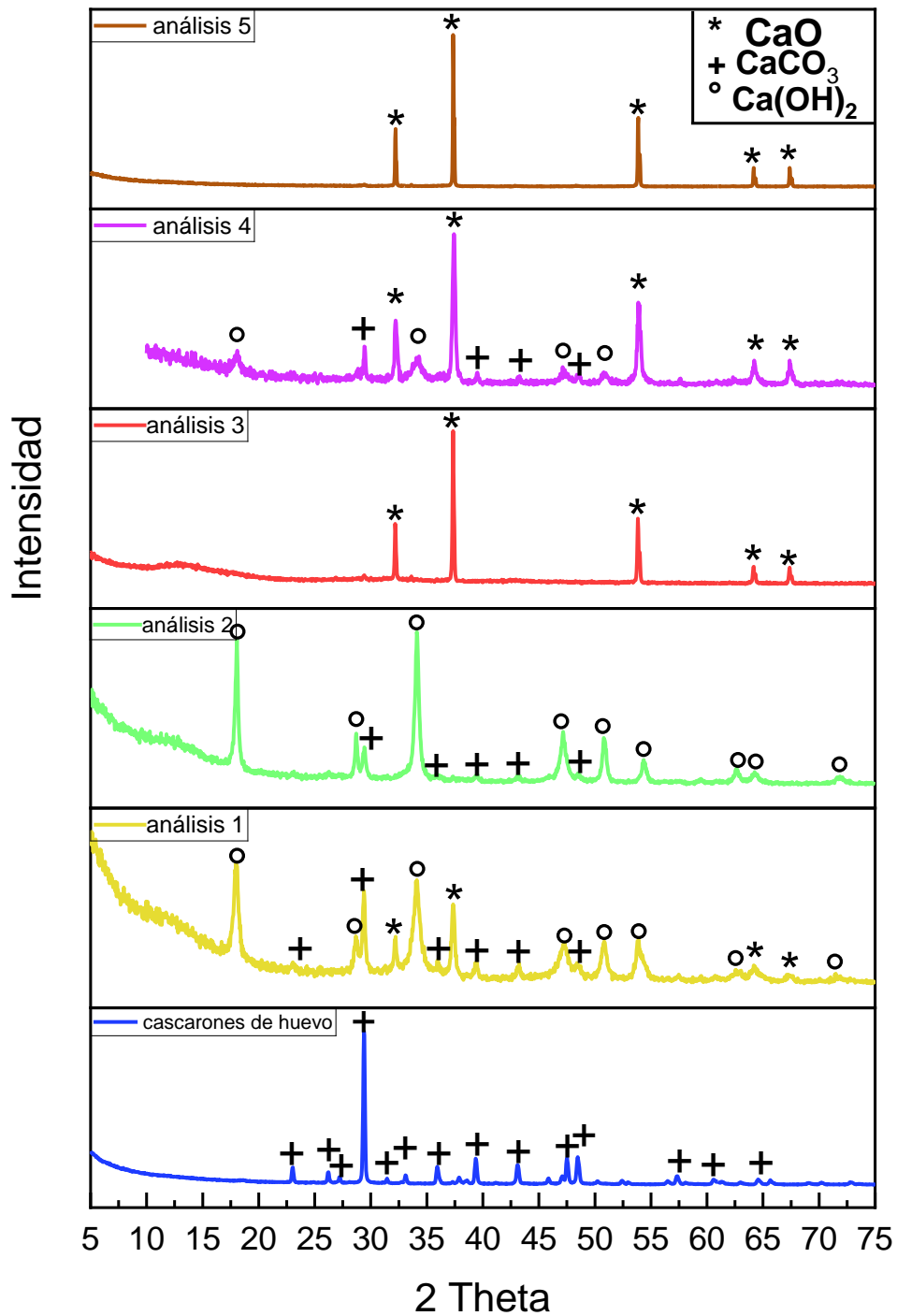


Figura III-4. difractogramas DRX de partículas de CaO sintetizadas a partir de CaCO<sub>3</sub> por medio de horno de microondas.

Se obtuvieron partículas de CaO y se verificó, con en análisis 5 en la cual alcanzó la fase que se requirió. La técnica DRX confirmó la formación de las partículas de CaO, asegurando un proceso de calcinación efectivo. El análisis por DRX permitió identificar la fase de CaO de acuerdo con los ángulos de difracción de  $32^\circ$ ,  $37^\circ$ ,  $54^\circ$  en  $2\theta$ .

Durante el proceso de calcinación, se monitorearon cuidadosamente los parámetros de temperatura y tiempo para optimizar la producción de CaO. La técnica DRX fue fundamental para identificar la presencia de carbonatos y otras impurezas antes y después del proceso, permitiendo realizar los ajustes necesarios para mejorar la calidad del producto final como se muestra en el análisis 5.

Además, el análisis detallado proporcionado por DRX no solo validó la efectividad del método empleado, sino que también nos dio información importante sobre la estructura cristalina de las partículas, contribuyendo a un mejor entendimiento del comportamiento del CaO bajo distintas condiciones.

### **3.1.2 Microscopia Electrónica de Barrido.**

Se procedió a analizar por el microscopio electrónico de barrido las partículas obtenidas por esta técnica.

En la figura III-5 a), tomada a una resolución de X5000, se ve la aglomeración de partículas de distintos tamaños. Se puede confirmar que el tamaño de las partículas es pequeño y constante, ya que no se aprecian partículas superiores a 5 micras. Esta observación es importante para asegurar la homogeneidad del material, lo cual es fundamental para su posterior uso en aplicaciones específicas.

Además, se procedió a buscar una imagen más detallada para obtener una visión más clara de las características morfológicas y estructurales de las partículas. Esta imagen de mayor resolución nos ayudó a identificar con mayor precisión cualquier variabilidad en el tamaño de las partículas y proporcionar información adicional sobre la distribución.

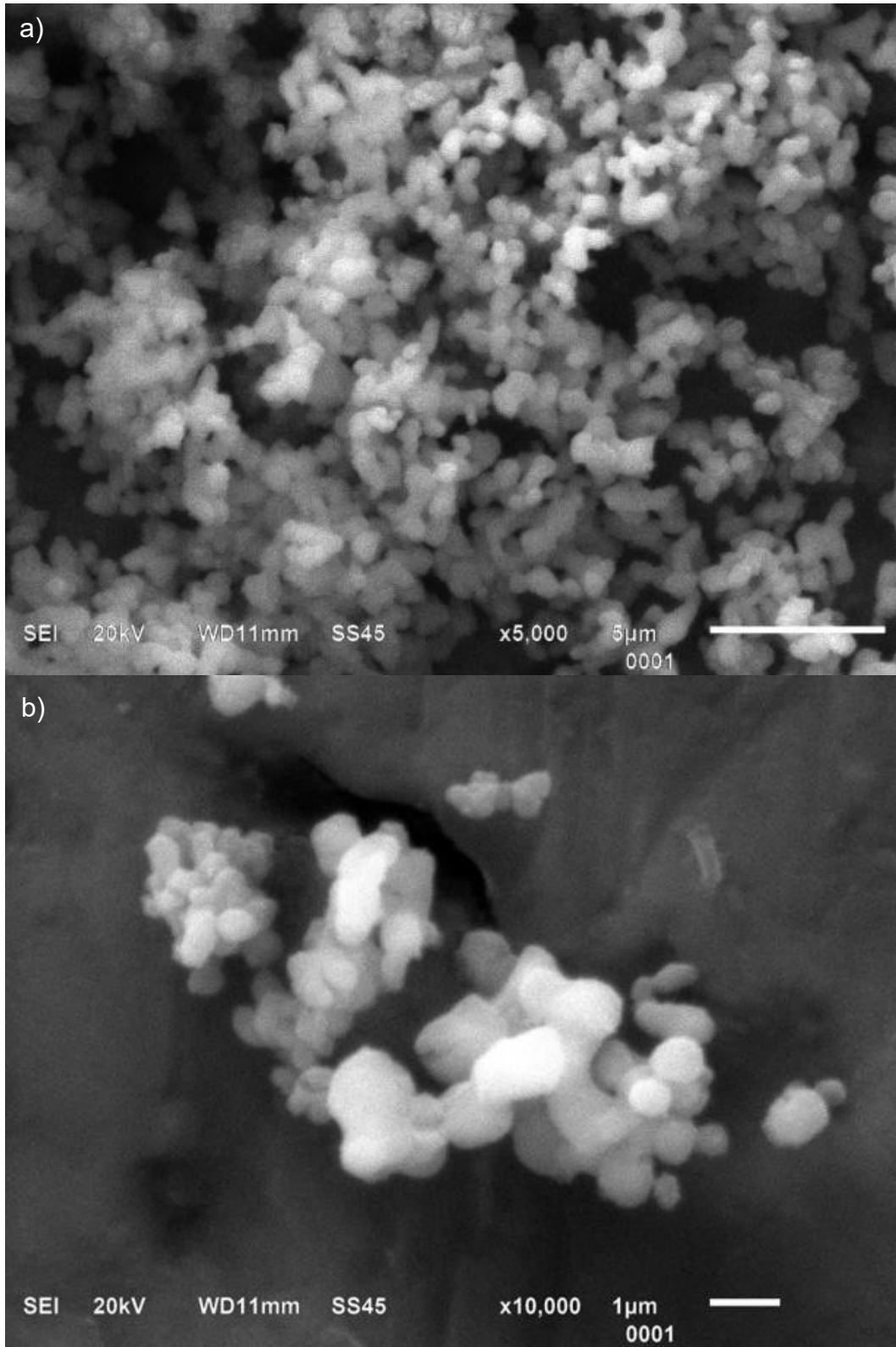


Figura III-5. Partículas de CaO en el microscopio electrónico de barrido con una resolución de a) x5000 y b) x10000.

En la figura III-5 b), capturada a una resolución de X10000, se puede apreciar con detalle la morfología de las partículas. predominan las morfologías esféricas, y se observan partículas con tamaños inferiores a 1 micra. Este análisis confirma que se obtuvo partículas muy pequeñas de CaO por el método de calcinación.

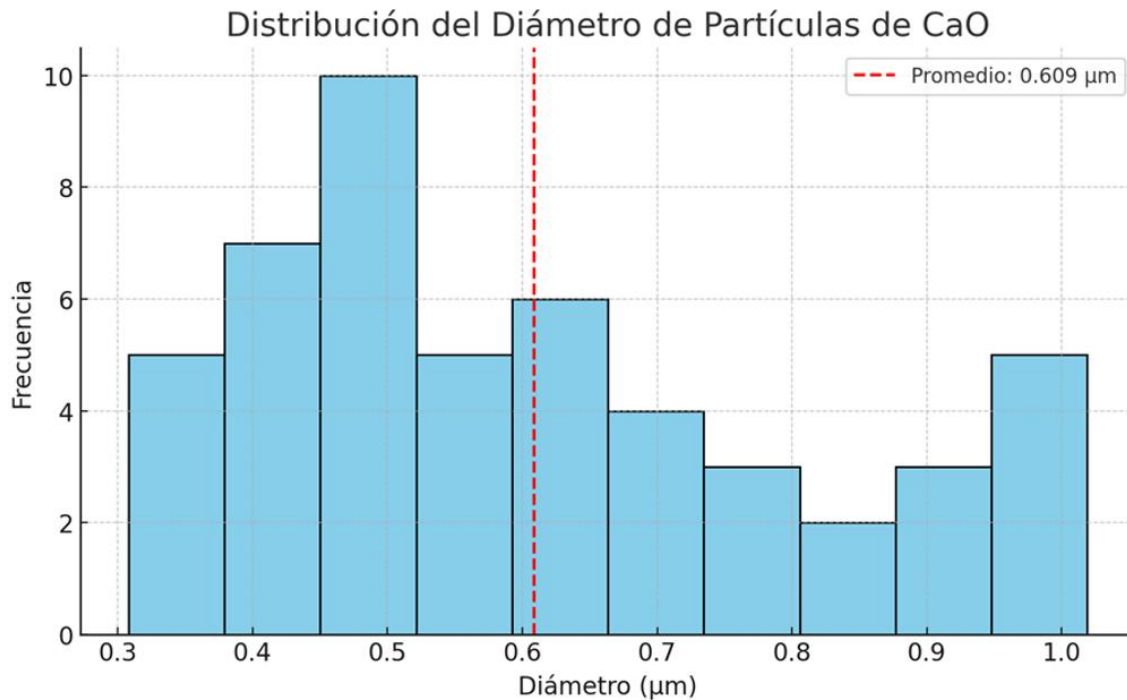


Figura III-6. Histograma de la distribución del diámetro de las partículas de CaO.

Se observa en el histograma de la figura III-6 que la línea roja punteada nos indica el promedio del diámetro que es de  $0.609 \mu\text{m}$ , además se observa que la mayoría de las partículas se agrupan en el rango de  $0.4$  y  $0.7 \mu\text{m}$ , Esta acumulación de partículas en rangos estrechos sugiere una buena uniformidad en el proceso de obtención o molienda del material. También se observa una cola hacia la derecha asimetría positiva, lo que indica la presencia de algunas partículas de mayor tamaño hasta  $1.0 \mu\text{m}$ , aunque en menor proporción. Esta dispersión sugiere que la mayoría del material presenta un tamaño homogéneo.

La alta resolución de la imagen permite observar la uniformidad y consistencia de las partículas, para su siguiente aplicación. Las partículas esféricas y de tamaño reducido son ideales para mejorar la reactividad y eficiencia en la

industria química y de materiales, a diferencia de la calcinación en mufla que el resultado es un CaO con una morfología muy porosa, rugosa e irregular, donde las partículas a menudo se presentan aglomeradas y con un tamaño de grano mayor debido al crecimiento inducido por el tiempo prolongado de exposición al calor. (González Mancera, 2006).

### 3.1.2 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de los cascarones de huevo y del CaO

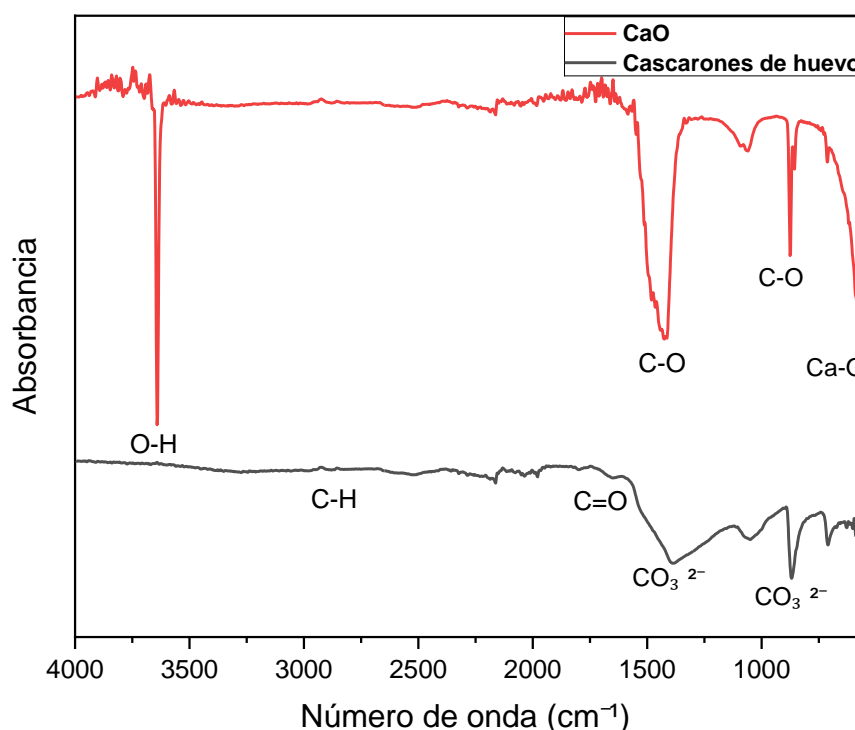


Figura III-7. Espectro FTIR de cascarones de huevo y partículas de CaO

El análisis nos permitió identificar grupos funcionales y posibles interacciones , en la región cercana a los 3400 cm<sup>-1</sup> aparece la banda O-H la cual nos indica la presencia de grupos hidroxilo, esto por agua absorbida, después en el rango de 2950-2850 cm<sup>-1</sup> se observa un estiramiento C-H lo que indica cadenas hidrocarbonadas, en la zona 1750-1500 cm<sup>-1</sup> emerge un pico de estiramiento de C=O característico de los carbonilos , en el rango de 1400-1300 cm<sup>-1</sup> existen deformaciones de O-H , entre 1100-1000 cm<sup>-1</sup> se aprecia una banda de

estiramientos C-O-C, finalmente entre el rango  $900-500\text{ cm}^{-1}$  aparecen huellas digitales asociadas a enlaces de Ca-O. La desaparición de bandas orgánicas y carbonatadas, junto con la aparición del ancho OH confirma que la calcinación logro transformar la mayor parte de  $\text{CaCO}_3$  en  $\text{CaO}$ .

### 3.2 Obtención de compósitos

#### Obtención del ionómero de vidrio modificado con CaO

La obtención ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO se realizó por las indicaciones del fabricante, el peso total de las partículas debe ser de 0.21 g junto con el volumen de ácido poliacrílico especificado. Además, el tiempo de elaboración no debe superar los 25 seg, ya que la mezcla tiende a endurecer muy rápidamente, pero no de forma homogénea. Posteriormente, se aplicó un fotocurado de 20 seg por cada lado, lo que permitió que la matriz adquiriera sus propiedades de dureza.

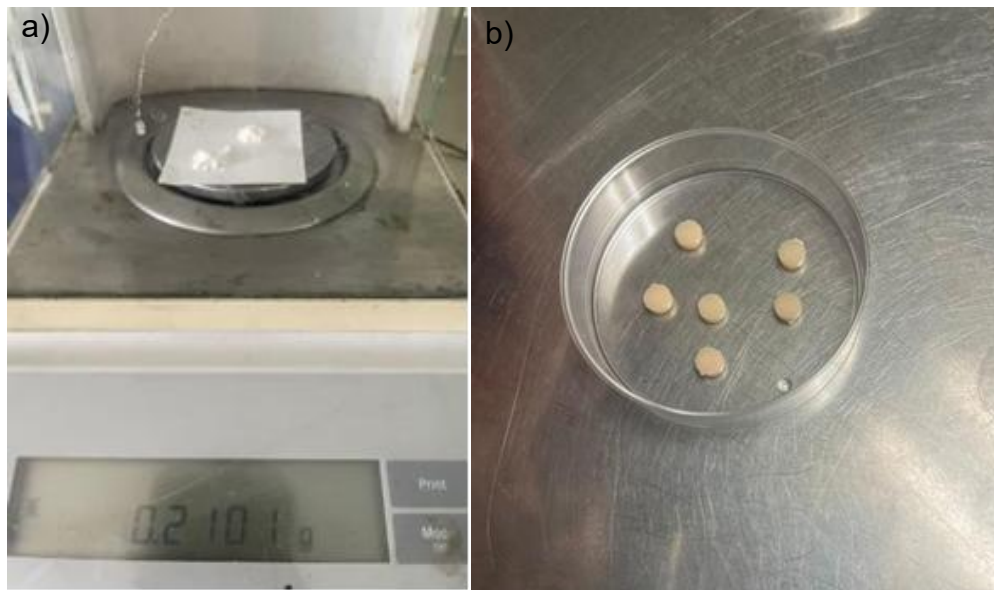


Figura III-8. a) pesaje de compuestos y b) probetas de ionómero de vidrio modificado.

Siguiendo las indicaciones del fabricante y ajustando las concentraciones de manera adecuada, se incorporaron las partículas de CaO en partículas de vidrio como se muestra en la figura III-7 a).

Estas se mezclaron con el ácido poliacrílico y mediante un método efectivo de fotocurado, se obtuvieron las probetas de ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO. Posteriormente, las probetas se almacenaron en cajas Petri como se muestra en la figura III-7 b).

### 3.2.1 Difracción de rayos X del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO

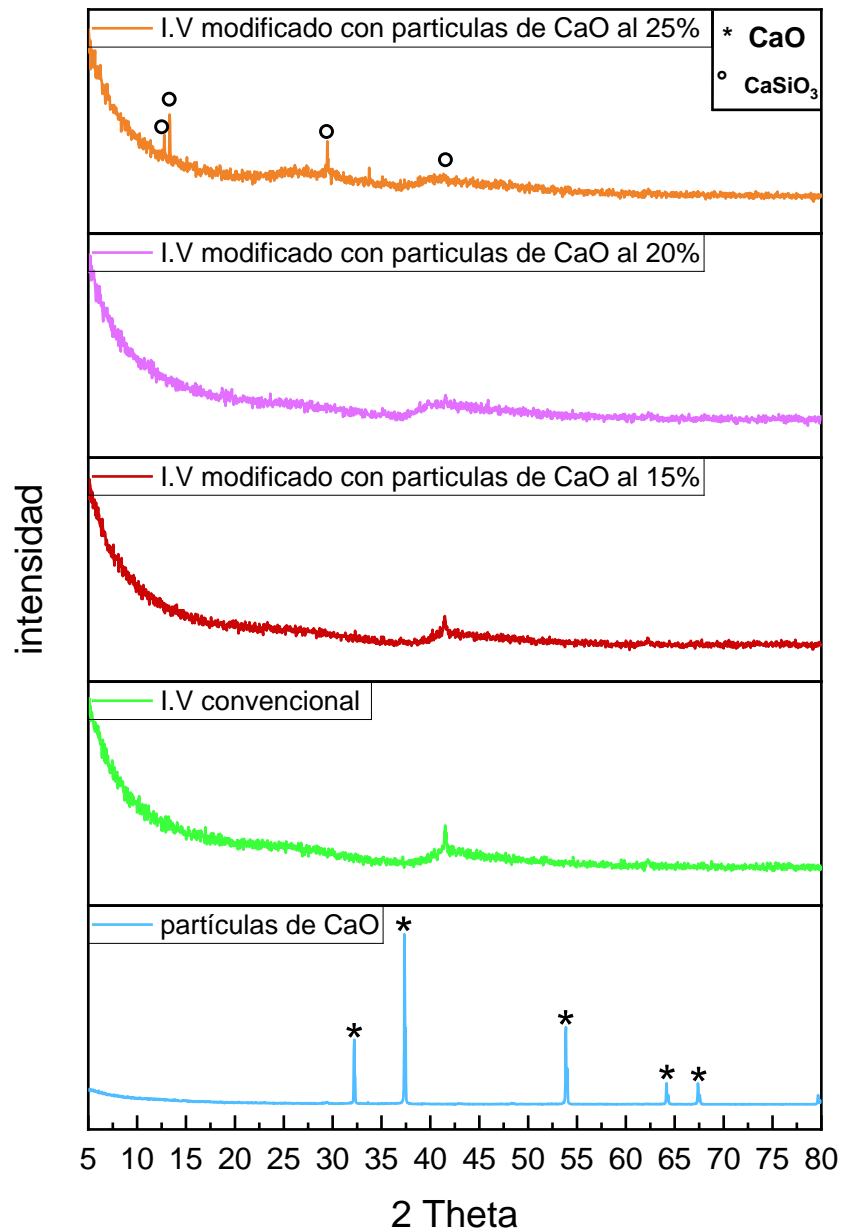


Figura III-9. Difractograma ionómero de vidrio modificado con CaO en porcentajes del 0%, 15%, 20% y 25%.

Caracterización para las partículas de ionómero de vidrio, en el cual se busca contrastar con los resultados que arroje la caracterización de probetas modificadas con las partículas de CaO.

A partir del difractograma III-8 donde es el ionómero de vidrio convencional se pueden apreciar ciertos aspectos. En primer lugar, la presencia de fases cristalinas ya que se observa un pico muy pronunciado alrededor de los  $41^\circ$ , esto nos indica la presencia de una fase cristalina de  $\text{CaCO}_3$  en esta muestra, el pico corresponde a una alta intensidad.

También da una idea de la estructura de la muestra ya que la intensidad disminuye rápidamente después del pico inicial y se mantiene con bajas fluctuaciones, esto indica que la muestra tiene una estructura amorfa o con pocas fases cristalinas.

El difractograma confirma la presencia de una fase cristalina dominante y sugiriendo una estructura mayormente amorfa en el resto del material.

El difractograma III-8. del ionómero de vidrio modificado con partículas al 15% se aprecia un pico prominente alrededor de  $43.^\circ$  y esto indica la presencia de una fase cristalina dominante de Si, esta fase es la responsable de la mayoría de la estructura cristalina observada. La alta intensidad inicial seguida de picos pequeños nos indica que este material puede tener una estructura mayormente amorfa con regiones cristalinas bien definidas. El material muestra una fase cristalina dominante y sugiere que tiene una estructura mayormente amorfa con algunas regiones cristalinas.

En el análisis del ionómero de vidrio modificado con 20% de partículas como se ve en el difractograma III-8 el pico inicial alrededor de los  $5^\circ$  indica la presencia de una fase cristalina, esta fase representa una parte significativa del material. La rápida disminución de la intensidad después del pico inicial y la posible estabilización nos indica que en el material contiene una fase amorfa o con pocas fases cristalinas. El incremento en la intensidad a los  $40^\circ$  puede corresponder a otros planos cristalinos específicos, lo que indica que hay otro compuesto en la muestra y se le atribuye al CaO y al Si.

Este difractograma sugiere la presencia de una fase cristalina dominante con una estructura mayormente amorfa en el resto del material.

En el análisis del ionómero de vidrio modificado con 25% de partículas como se muestra en el difractograma III-8 se puede apreciar un pico muy alto entre los 5° esto indica una fase cristalina dominante en esta muestra. Después que la intensidad disminuye después del pico inicial, indicando que el material tiene una estructura mayormente amorfa y con pocas fases cristalinas adicionales. Entre los 40° se observa un aumento leve en la intensidad y esto puede corresponder a otros planos cristalinos específicos y sugiere la presencia de otros compuestos o fases cristalinas en la muestra, esta información se compara con la base de datos AMCSD para así comparar los picos obtenidos con los difractogramas disponibles en la base de datos para identificar la fase cristalina presente en la muestra en los cuales se identifico el  $CaSiO_3$ . (AMCSD 2024. Estructura cristalina ). Finalmente, después de los 40° la intensidad se estabiliza en niveles bajos lo que indica que la mayor parte del material no presenta un orden cristalino después de la fase principal.

### **3.2.2 Microscopia Óptica del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO**

Al ionómero modificado con partículas de CaO se caracterizó con diferentes técnicas esto para ver su morfología y composición del ionómero modificado obtenido.

Según Barcena Rosey (2006), el ionómero de vidrio es un material conocido por su capacidad de adherirse químicamente a la dentina y el esmalte dental, proporcionando una unión resistente a los ácidos y duradera.

Primero se realizó una caracterización del ionómero de vidrio sin ninguna modificación para contrastar los resultados con los del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO. Como se muestra en la figura III-8 inciso a) 0%.

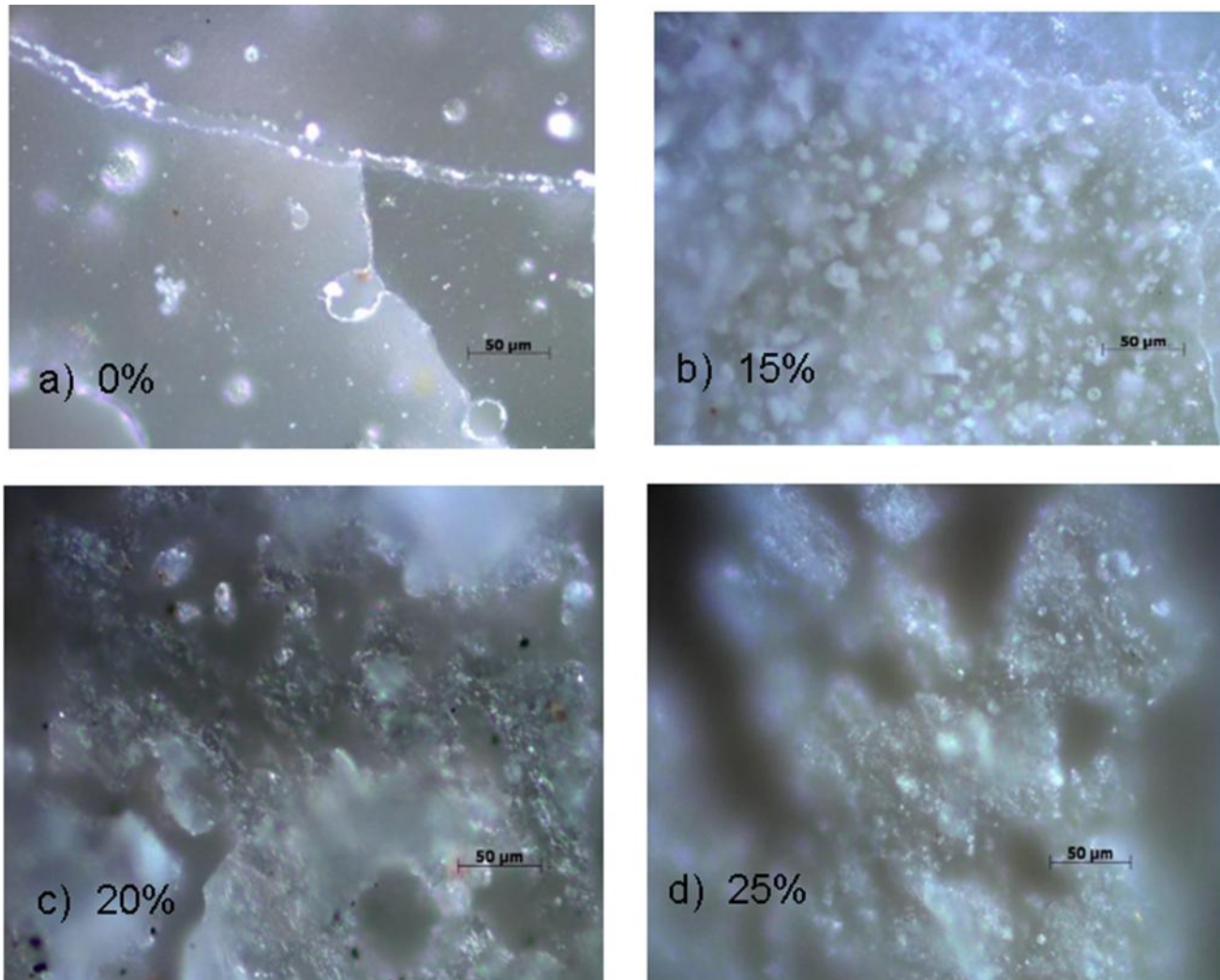


Figura III-10. Probetas de ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO en concentración del a) 0%, b) 15%, c) 20% y d) 25% con lente 50x.

La caracterización demostró una morfología amorfa y ligeramente traslucida. También se observaron algunas uniones entre las partículas del material (Lifeder, 2024). Esta técnica se realizó utilizando un lente de resolución 50x.

En la segunda caracterización se le aplicó la técnica al ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO en una concentración del 15% de partículas como se puede apreciar en la figura III-9 b) 15% se obtuvo una imagen opaca en el material debido a la incorporación de las partículas, lo que tornó la probeta de una coloración blanca apreciable (Lifeder, 2024) además se pudo notar una distribución de las partículas en el ionómero de vidrio.

En la tercera caracterización se le aplicó la técnica al ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO en una concentración del 20% de partículas como se puede apreciar en la figura III-9 c) 20% se obtuvo una imagen interesante. Se puede apreciar una mayor presencia de CaO sobre el ionómero de vidrio. Las áreas más opacas indican una mayor concentración de partículas de CaO. Los distintos relieves que comenzaron a aparecer en varias partes de la probeta se deben a una mayor concentración de partículas en el ionómero de vidrio, debido a los problemas de relieve causados por la presencia de más partículas de CaO, se observó que las áreas opacas correspondían a las partículas de CaO, mientras que las áreas traslucidas correspondían al ionómero de vidrio.

En la cuarta caracterización se le aplicó la técnica al ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO. En una concentración del 25% de partículas de CaO, como se muestra en la figura III-9 d) 25%. En la caracterización se observó un aglomeramiento inusual de las partículas de vidrio con las partículas de CaO, nos muestra una morfología porosa y una aglomeración desproporcionada, además de grietas en el material las cuales demuestran poca resistencia mecánica, la probeta de vidrio modificado con partículas de CaO se puede observar una concentración mayor de partículas de CaO y pocas zonas traslucidas.

### **3.2.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO**

Se analizaron las probetas mediante microscopía infrarroja por transformada de Fourier, obteniendo información detallada sobre los grupos funcionales

presentes. Observamos en la figura III-10 desplazamientos en la región del O-H, lo que sugiere una reducción de los grupos hidroxilo debido a la formación de enlaces más fuertes. Este cambio indica que podrían estar ocurriendo interacciones moleculares que fortalecen la estructura del material.

También se detectaron cambios en la banda del C=O; su disminución sugiere una reducción de estos grupos funcionales a causa de reacciones de hidrogenación. Las variaciones en las bandas C-H nos señalan posibles alteraciones en las cadenas alifáticas, reflejando modificaciones en la composición orgánica. Además, se evidenciaron cambios en la región del C-O, implicando reacciones adicionales que afectaron la muestra. Estos cambios en los grupos funcionales pueden influir significativamente en propiedades como la estabilidad térmica, la reactividad química y las propiedades mecánicas. Comprender estas transformaciones es esencial para anticipar el comportamiento del material en diversas aplicaciones.

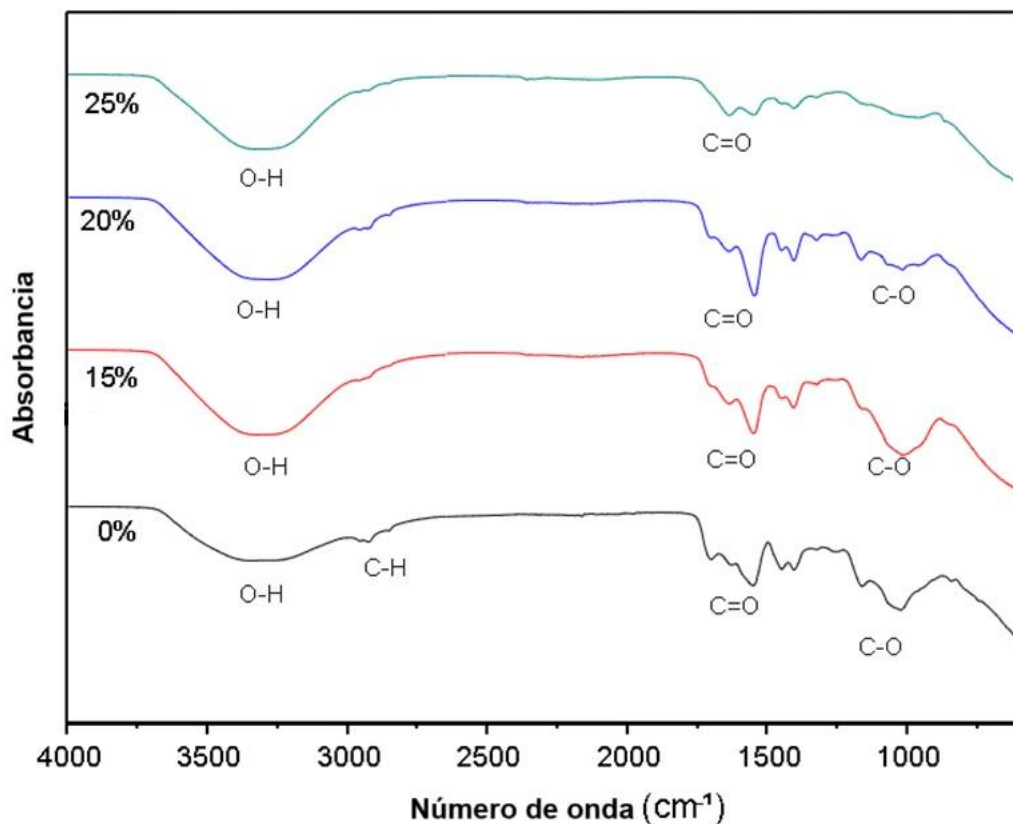


Figura III-11. Espectro FTIR de las probetas de ionómero de vidrio modificado con partículas de *CaO* en concentraciones de 0%, 15%, 20% y 25%.

### 3.3 Determinación de la concentración mínima inhibitoria de partículas de CaO

#### Evaluación de las propiedades antimicrobianas de las partículas

Para la evaluación de la actividad antimicrobiana de las partículas de CaO, se utilizó la técnica de microdilución en caldo. Esta técnica determina la capacidad de las partículas de CaO de inhibir o destruir bacterias, basándose en la observación de cambios de color en cada pozo de la placa de microdilución (Khan, S., & Ahmad, I., 2010).

El principio de la técnica radica en la preparación de una serie de diluciones de las partículas de CaO en caldo de cultivo, después de la inoculación con una suspensión bacteriana estándar. Tras un período de tiempo, se evalúa la coloración de cada pozo. El viraje de color proporciona información crucial sobre el crecimiento bacteriano: si el color se torna rosa, indica la presencia de bacterias activas; en cambio, si el pozo permanece azul oscuro, se confirma la inhibición del crecimiento bacteriano como se muestra en la figura III-11.

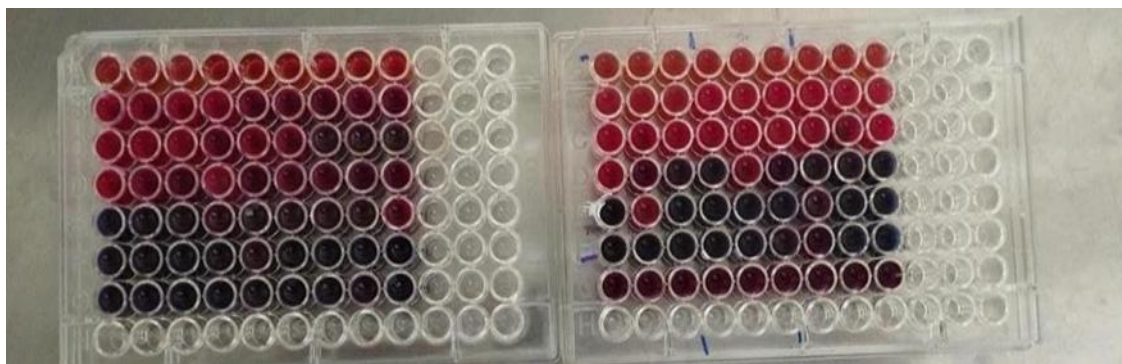


Figura III-12. Placas de Elisa con las cepas *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* 25923 y para *Staphylococcus aureus* BA477 contra partículas de CaO.

La elección de los indicadores de color es esencial para este tipo de ensayos. En este caso, el cambio de color se debe a un indicador redox que reacciona con los productos metabólicos bacterianos, proporcionando así una señal visual clara del estado del crecimiento bacteriano. La técnica de microdilución en caldo es

ampliamente reconocida por su precisión y reproducibilidad, lo que la convierte en una herramienta indispensable para la evaluación de la eficacia antimicrobiana.

Se evaluó la eficacia del método frente a tres cepas bacterianas distintas, representativas de microorganismos comúnmente asociados con infecciones bucales y enfermedades periodontales.

Los resultados obtenidos, reproducibles en las tres repeticiones realizadas, demostraron la consistencia y fiabilidad del enfoque aplicado, lo que refuerza su potencial utilidad en contextos clínicos relacionados con la salud oral.

Los resultados fueron validados mediante controles positivos y negativos, lo que permitió confirmar la precisión del método y descartar posibles errores técnicos. Las muestras con control positivo mostraron claramente inhibición bacteriana, tal como se esperaba, mientras que los controles negativos presentaron un crecimiento bacteriano consistente, lo que respalda la fiabilidad de los hallazgos observados. (Murray, B. E., & Ayers, S. J., 2021).

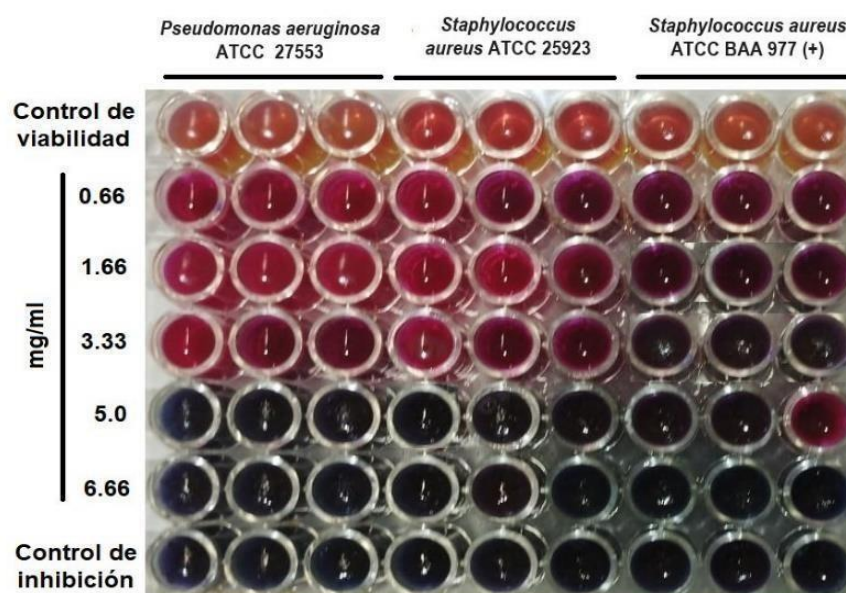


Figura III-13. resultados de la prueba de microdilución en caldo para las cepas *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27553, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 y *Staphylococcus aureus* ATCC BAA 977 (+).

En la figura III-12 se observa la microdilución en caldo de las cepas *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27553, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 y *Staphylococcus aureus* ATCC BAA 977 (+).

La figura muestra que *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27553 y *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 presentan la misma concentración mínima inhibitoria (MIC) de 5 mg/ml. En cambio, para *Staphylococcus aureus* ATCC BAA 977 (+), la concentración mínima inhibitoria es aún menor, ya que con 1.66 mg/ml se observa una inhibición que se comprueba a una concentración de 3.33 mg/ml. Esto indica que la MIC de esta última bacteria ronda entre 1.66 y 3.33 mg/ml.

Estos resultados nos indican que con una concentración mínima inhibitoria de 5 mg/ml se obtiene un 100 % de la población bacteriana muerta en los tres casos. La diferencia en las MICs destaca la variabilidad en la sensibilidad de las diferentes cepas bacterianas al tratamiento con CaO. Este análisis proporciona información valiosa para el ajuste de concentraciones ideales en aplicaciones antimicrobianas, asegurando una eliminación de los microorganismos patógenos. (Pérez, A., & Torres, C., 2023).

Basándose en los resultados anteriores, se evaluó el material en otras cepas que se sabe están presentes en los dientes y actúan como patógenas. Las cepas que se estudiaron son *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans* ATCC 25175, como se muestra en la figura III-13.

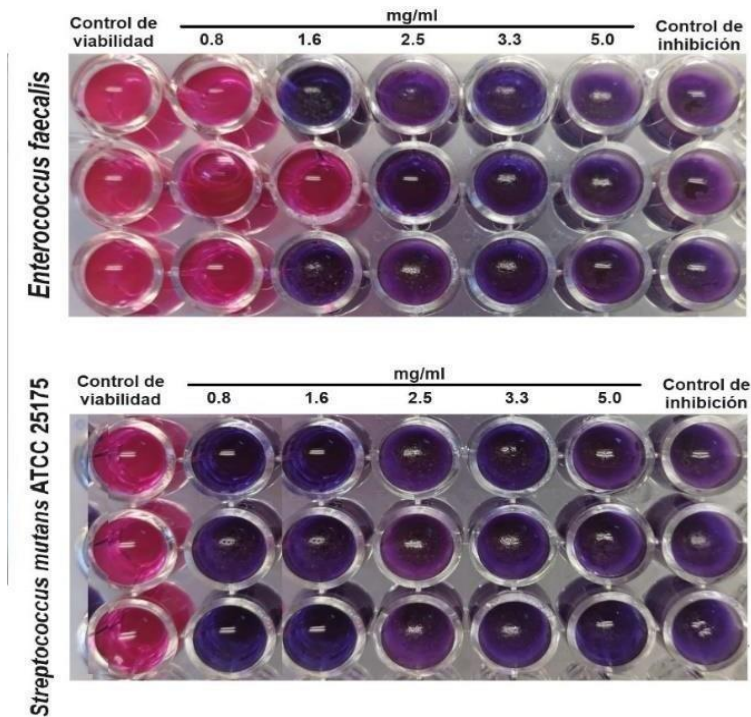


Figura III-14. Resultados de la prueba de microdilución en caldo para las cepas *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans* ATCC 25175

Para la bacteria *Enterococcus faecalis*, se determinó que la concentración mínima inhibitoria (MIC) es de 1.6 mg/ml. Sin embargo, para la prueba realizada en la cepa *Streptococcus mutans* ATCC 25175, la MIC resultó ser aún menor, indicando que con una concentración más baja de partículas se logra la inhibición de la bacteria como lo describe (Lebreton., 2014) por esta razón, se decidió repetir la prueba utilizando una concentración menor de partículas para confirmar los resultados como se muestra en la figura III-14.



Figura III-15. Segunda microdilución en caldo para la bacteria *Streptococcus mutans* ATCC 25175.

Se llevo a cabo la técnica nuevamente para así dar con la concentración mínima inhibitoria para *Streptococcus mutans* ATCC 25175 dándonos una concentración aún menor para la inhibición de este tipo de bacteria.

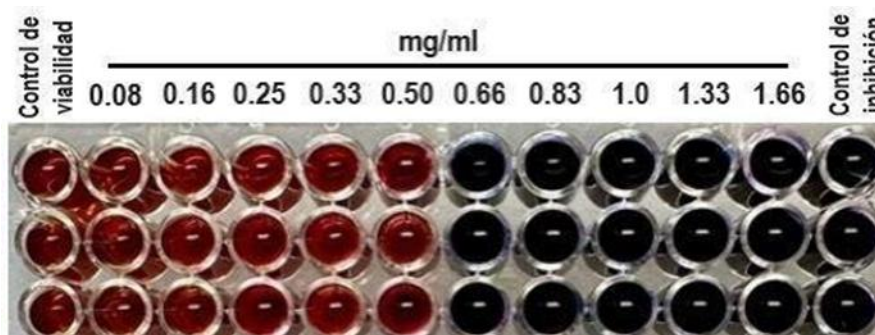


Figura III-16. resultados de la microdilución en caldo de la cepa *Streptococcus mutans* ATCC 25175.

Finalmente se determinó que la concentración mínima inhibitoria para la cepa *Streptococcus mutans* ATCC 25175 es de 0.66 mg/ml, como se muestra en la figura III-15 lo que indica una buena inhibición con una cantidad reducida de partículas de CaO. Esta metodología permitió confirmar la eficacia del agente antimicrobiano evaluado contra *Streptococcus mutans* ATCC 25175, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos (Saini et al., 2021).

### 3.4 Evaluación de efecto antibacterial de compósitos

#### Evaluación de las propiedades antibacterianas del ionómero de vidrio modificado con CaO

La evaluación de las propiedades antibacterianas del ionómero de vidrio modificado con CaO inicialmente arrojó resultados favorables Las muestras se dejaron incubar durante 48 horas y, al finalizar este periodo como lo propone (Clinical and Laboratory Standards Institute 2015), se apreció un halo de inhibición se trabajó con concentraciones del 0% ,15% ,20% y 25% respectivamente para las dos cepas trabajadas, *Enterococcus faecalis* y *Streptococcus mutans* ATCC 25175.

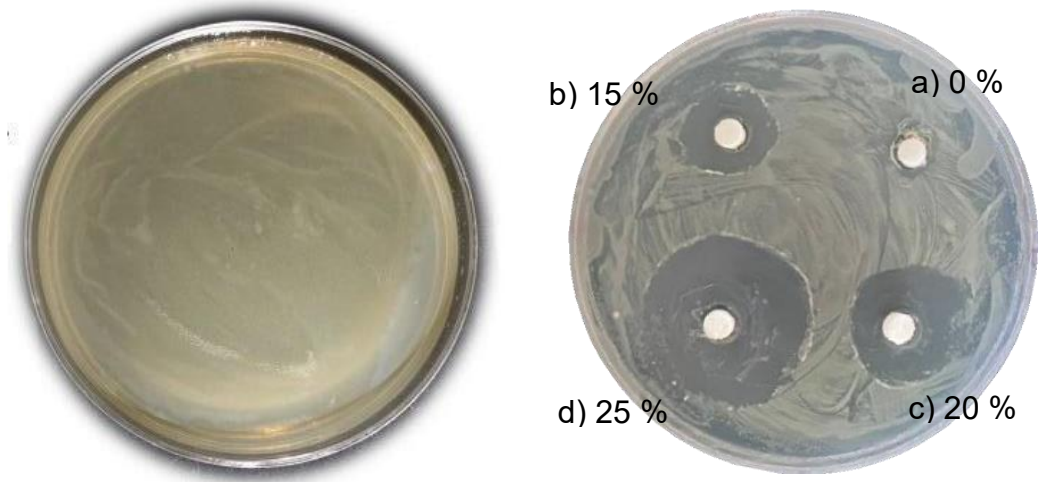
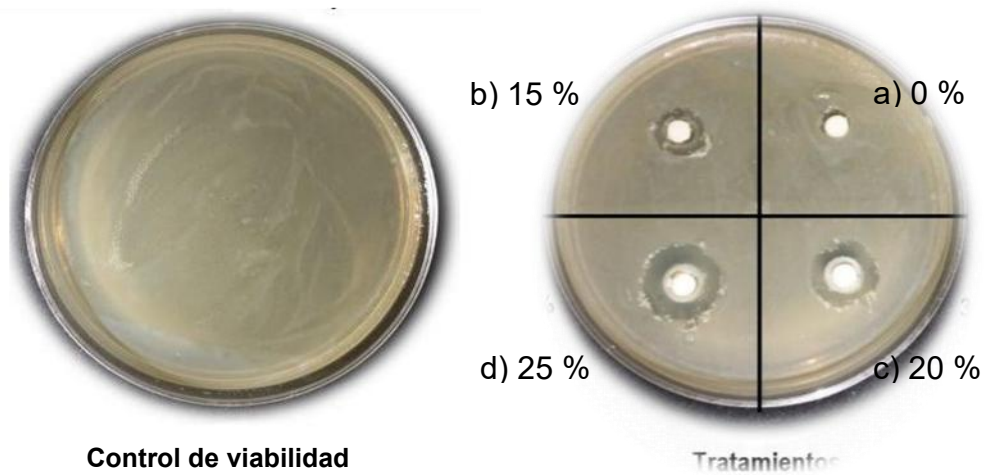


Figura III-17. halos de inhibición en los tratamientos a a) 0%, b) 15%, c) 20% y d) 25% en la cepa *Enterococcus faecalis*.



halos de inhibición en los tratamientos a a) 0%, b) 15%, c) 20% y d) 25% en la cepa *Streptococcus mutans* ATCC 25175.

Figura III-18. halo de inhibición de las probetas de ionómero de vidrio modificado con CaO en concentraciones del a) 0%, b) 15%, c) 20% y d) 25% en la cepa *Streptococcus mutans* ATCC 25175.

En estas concentraciones, la inhibición del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO se pudo identificar gracias a la presencia del halo de inhibición, donde la bacteria dejó de crecer incluso bajo condiciones ideales.

Los tamaños de halos de inhibición para la cepa *Enterococcus faecalis* fueron los siguientes:

Porcentaje de partículas de CaO en el I.V Petri 1	Tamaño de halo de inhibición (cm)	Porcentaje de partículas de CaO en el I.V Petri 2	Tamaño de halo de inhibición (cm)	Porcentaje de partículas de CaO en el I.V Petri 3	Tamaño de halo de inhibición (cm)
0%	0 cm	0%	0 cm	0%	0 cm
15%	1.5 cm	15%	1.2 cm	15%	1.2 cm
20%	2.2 cm	20%	2.3 cm	20%	1.6 cm
25%	2.9 cm	25%	2.9 cm	25%	2.7 cm

Tabla III-1. Datos obtenidos de halos de inhibición para la cepa *Enterococcus faecalis*.

Los tamaños de halos de inhibición para la cepa *Streptococcus mutans* ATCC 25175 fueron los siguientes:

Porcentaje de partículas de CaO en el I.V Petri 1	Tamaño de halo de inhibición (cm)	Porcentaje de partículas de CaO en el I.V Petri 2	Tamaño de halo de inhibición (cm)	Porcentaje de partículas de CaO en el I.V Petri 3	Tamaño de halo de inhibición (cm)
0%	0 cm	0%	0 cm	0%	0 cm
15%	0.6 cm	15%	0.6 cm	15%	0.5 cm
20%	0.8 cm	20%	0.9 cm	20%	0.8 cm
25%	1.1 cm	25%	1.1 cm	25%	1.2 cm

Tabla III-2. Datos obtenidos de halos de inhibición para la cepa *Streptococcus mutans* ATCC 25175.

La técnica se hizo por triplicado para esta cepa y se procedió a sacar el promedio de los resultados obtenidos y así saber el porcentaje que tiene sobre el total que es el tamaño de una caja Petri.

Porcentaje de partículas de <i>CaO</i> en el I.V	Media del tamaño de halo de inhibición (cm)	Porcentaje de inhibición para cepa <i>Enterococcus faecalis</i>
0%	0 cm	0%
15%	1.3 cm	15.3 %
20%	2.03 cm	23.9 %
25%	2.83 cm	33.3%

Tabla III-3. Porcentaje de inhibición de las probetas modificadas sobre una caja Petri.

Porcentaje de partículas de <i>CaO</i> en el I.V	Media del tamaño de halo de inhibición (cm)	Porcentaje de inhibición para <i>Streptococcus mutans ATCC25175</i>
0%	0 cm	0%
15%	0.56 cm	6.5%
20%	0.83 cm	9.76%
25%	1.13 cm	13.29%

Tabla III-4. Porcentaje de inhibición de las probetas modificadas sobre una caja Petri.

Brindhadevi et al., (2024) reportaron halos de inhibición de 0,14 cm frente a *Streptococcus mutans* ATCC 25175, mientras que Singh et al., (2023) observaron halos de 0,23 cm contra *Enterococcus faecalis*, al emplear nanopartículas de CaO. Estos resultados confirman que la incorporación de CaO al ionómero de vidrio confiere actividad antibacteriana, y muestran además que el diámetro del halo de

inhibición aumenta de forma proporcional al porcentaje de partículas añadidas. En este caso, al utilizar concentraciones del 15% de CaO, se consiguió preservar las propiedades estéticas y mecánicas del ionómero de vidrio. al mismo tiempo que se obtiene un efecto de inhibición bacteriana significativo, sin comprometer la integridad de la matriz del material.

## CAPITULO IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la síntesis de partículas de CaO mediante microondas en una capsula refractaria con un recubrimiento de silicio, así como su incorporación en un ionómero de vidrio, para conferirle actividad antibacterial.

La conversión de cascarones de huevo en CaO se logró mediante un proceso que incluyó limpieza, molienda en molino de bolas y tamizado, optimizando así la reducción del tamaño de partículas para favorecer una calcinación homogénea. La comparación entre la calcinación convencional y la realizada por microondas evidenció que esta última permite alcanzar la transformación de  $\text{CaCO}_3$  a CaO en tiempos significativamente reducidos hasta en un 85% menor, alcanzando temperaturas de calcinación.

Mediante el uso de radiación de microondas a una potencia de 4 durante 12 minutos, se logró la calcinación de la materia prima y la formación de partículas esféricas de CaO con tamaños promedio de  $0.609 \mu\text{m}$ . El recubrimiento de silicio de la capsula optimizo la uniformidad térmica y permitió alcanzar temperaturas de hasta  $900^\circ\text{C}$  lo cual favoreció la cristalización del CaO sin generar fases secundarias no deseadas. Este enfoque coincide con lo descrito por (Pérez-Larios, 2022) quienes reportaron que la tecnología de microondas reduce el tiempo de síntesis y mejora el control del tamaño de partícula.

La caracterización por microscopía electrónica de barrido a resoluciones de X5000 y X10000 confirmó que las partículas de CaO obtenidas presentan un tamaño reducido y una morfología uniformemente esférica. A una resolución de X5000 se constató la ausencia de partículas superiores a  $5 \mu\text{m}$ , lo que indica una homogeneidad. En imágenes de mayor resolución (X10000), se observó que la mayoría de las partículas tienen un diámetro inferior a  $1 \mu\text{m}$ , concentrándose principalmente en el rango de  $0.4$  a  $0.7 \mu\text{m}$ , con un promedio de  $0.609 \mu\text{m}$  y una dispersión moderada algunos hasta  $1.0 \mu\text{m}$ . Estos resultados resaltan la eficacia del proceso de calcinación empleado para generar un material de alta uniformidad y reactividad, contrastando con la morfología porosa e irregular obtenida mediante calcinación en mufla, donde la exposición prolongada al calor induce aglomeración (González Mancera, 2006).

La caracterización mediante DRX del ionómero de vidrio modificado con partículas de CaO evidenció diferencias notables en la estructura cristalina. En el ionómero de vidrio convencional se identificó un pico muy pronunciado alrededor de  $41^\circ$  en  $2\theta$ , correspondiente a una fase cristalina definida de  $\text{CaCO}_3$ , aunque la rápida disminución de la intensidad que le sigue sugiere que el resto del material posee una estructura mayormente amorfa o con escasas fases cristalinas.

En contraste, el ionómero de vidrio modificado con 15% de partículas, mostró un pico prominente a  $43.2^\circ$  en  $2\theta$ , que indica la formación predominante de CaO con regiones cristalinas bien definidas, coexistiendo con una matriz amorfa que se evidencia en los picos secundarios. En el ionómero de vidrio modificado con 20% revela la presencia de una fase cristalina inicial cerca de  $5^\circ$  en  $2\theta$  y un incremento en la intensidad alrededor de  $40^\circ$  lo que apunta a la coexistencia de otra fase asociada a CaO dentro de un entorno mayormente amorfo. Finalmente, ionómero de vidrio modificado con 25% presenta un pico muy alto al inicio alrededor de  $5^\circ$  seguido de un leve aumento de intensidad a los  $40^\circ$  lo cual sugiere la aparición de fases adicionales o compuestos secundarios; estos resultados han sido cotejados con la base de datos AMCSD (AMCSD 2024).

En conjunto, estos hallazgos indican que, aunque se logra una transformación significativa del  $\text{CaCO}_3$  en ionómero de vidrio, persiste una porción de material amorfo y la coexistencia de múltiples fases cristalinas.

El análisis mediante microscopía infrarroja por transformada de Fourier permitió identificar modificaciones clave en los grupos funcionales del material. Se observaron desplazamientos en la región del O–H, lo que sugiere una reducción de los grupos hidroxilo debido a la formación de enlaces más fuertes, indicando interacciones moleculares que fortalecen la estructura del material, además, la disminución en la banda del C=O señala reacciones de hidrogenación de estos grupos, mientras que las variaciones en las bandas de C–H evidencian alteraciones en las cadenas alifáticas, reflejando modificaciones en la composición orgánica. Los cambios detectados en la región del C–O implican la ocurrencia de reacciones adicionales que afectan la muestra.

El método de microdilución en caldo se demostró como una técnica fiable y reproducible para evaluar la actividad antibacteriana de las partículas de CaO.

El ensayo se desarrolló en placas ELISA de 96 pozos, en las que se evaluaron distintas concentraciones de CaO y se utilizó resazurina como indicador redox para determinar la viabilidad bacteriana a través del cambio de color de azul a rosa. Los resultados obtenidos evidenciaron que este protocolo permite identificar eficazmente entre concentraciones inhibitorias y no inhibitorias, comprobando la eficacia antibacteriana del material frente a *Streptococcus mutans* ATCC 25175 y *Enterococcus faecalis*.

Las partículas de CaO mostraron una capacidad inhibitoria significativa frente a *Streptococcus mutans* ATCC 25175 y *Enterococcus faecalis*, con concentraciones mínimas inhibitorias (CMI) de 0.66 mg/ml y 1.6 mg/ml, respectivamente.

Al incorporar CaO en la matriz del ionómero de vidrio en proporciones del 15 %, 20 % y 25 % en peso, se observó un incremento progresivo en el diámetro de los halos de inhibición contra *Streptococcus mutans* y *Enterococcus faecalis*. En particular, la muestra al 15 % empezó a presentar un efecto antibacterial, con halos de 0.56 cm y 1.3 cm, respectivamente. Sin embargo, al exceder el 20 %, se registró una pérdida de propiedades estéticas y pérdida de dureza.

## CAPITULO V. BIBLIOGRAFÍA

[1] Alejandro Álvarez Rodríguez. (2017). Síntesis y caracterización de fases cristalinas en el sistema Na<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub> con propiedades antimicrobianas. *centro de investigación de nanomateriales y nanotecnología* , 54–71.

[2] Atchudan, R., Perumal, S., Joo, J., & Lee, Y. R. (2022). Synthesis and Characterization of Monodispersed Spherical Calcium Oxide and Calcium Carbonate Nanoparticles via Simple Pyrolysis. *Nanomaterials*, 12(14).

[3] Balandrán Quintana, R. R., & Mendoza Wilson, A. M. (2021). Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 15(3), 76–94.

[4] Bowen, W. H. (2016). Dental caries – not just holes in teeth! A perspective. *Molecular Oral Microbiology*, 31(3), 228–233  
<https://doi.org/10.1111/omi.12132>

[5] Brito Fermín, T., Lorenzo Olano Dextre, T., Teixeira das Neves, L., Ramos Pinheiro, C., & Kenji Nishiyama, C. (2016). Actividad antimicrobiana y biocompatibilidad de los cementos endodónticos a base de hidróxido de calcio. Antimicrobial activity and biocompatibility of calcium hydroxide-based endodontic sealers. *Revista ADM*, 73(2), 60–64.

[www.medigraphic.com/adm](http://www.medigraphic.com/adm)  
[www.medigraphic.org.mx](http://www.medigraphic.org.mx)

[6] Elizabeth Rodil Posada, S., Manero Brito, O., Sánchez Solís, A., Beltrán Sánchez, M., Guadarrama Acosta, P., Vera Graziano, R., & de la Torre Sánchez, R. G.

(2016). Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, Vol. 9 No. 16, enero-junio 2016. En [www.mundonano.unam.mx](http://www.mundonano.unam.mx) | (Vol. 9, Número 16). [www.mundonano.unam.mx](http://www.mundonano.unam.mx)

[7] Hao, Y., Huang, X., Zhou, X., Li, M., Ren, B., Peng, X., & Cheng, L. (2018). Influence of dental prosthesis and restorative materials interface on oral biofilms. En *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 19, Número 10).

MDPI AG.

[8] Kasirajan, R., Bekele, A., & Girma, E. (2022). Adsorption of lead (Pb-II) using CaO-NPs synthesized by solgel process from hen eggshell: Response surface

methodology for modeling, optimization, and kinetic studies. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40, 209–229.

[9] Kumari, S., Singh, V., & Singh, D. (2024). Nanoparticle synthesis advancements and their application in wastewater treatment: A comprehensive review. *Current Chemistry Letters*, 13(1), 31–40.

[10] Luis, J., López, M., & López, R. (2012). *Los materiales nanoestructurados*. Moya, J. S., Esteban-Tejeda, L., Pecharromán, C., Mello-Castanho, S. R. H., da Silva,

[11] A. C., & Malpartida, F. (2011). Glass Powders with a High Content of Calcium Oxide: A Step Towards a “Green” Universal Biocide. *Advanced Engineering Materials*, 13(6), B256–B260.

[12] Ruiz, G. (2011). Lime, an Ancient Material as a Renewed Option for Construction. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 1, 93–102.

[13] Shenoy, A. (2008). Is it the end of the road for dental amalgam? A critical review. *Journal of Conservative Dentistry*, 11(3), 99.

[14] Saini, R., Saini, S., & Sharma, S. (2021). Evaluation of antibacterial activity of concentrated growth factor against *Streptococcus mutans*: An in vitro study. *Journal of Health and Allied Sciences* Taylor and Francis Ltd.

[15] Tu, Y., Ren, H., He, Y., Ying, J., & Chen, Y. (2023b). Interaction between microorganisms and dental material surfaces: general concepts and research progress. En *Journal of Oral Microbiology* (Vol. 15, Número 1). Taylor and Francis Ltd.

[16] Vázquez Olmos, A. R., Vega Jiménez, A. L., & Paz Díaz, B. (2018). Mecanosíntesis y efecto antimicrobiano de óxidos metálicos nanoestructurados. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 11(21), 29.

[17] Villegas, Á. M., Naranjo, E., & Gómez, D. M. (2008). Tests of biocompatibility for dental materials. Review of the literature. *Revista*, 38–44.

[18] Yajaira, H., De La Peña, L., Hernández-Centeno, F., & Muzquiz-Ramos, E. M. (2019, septiembre 23). *Actividad antimicrobiana de nanopartículas de CaO*

sobre *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. 3–5.  
comph<sup>https://www.researchgate.net/publication/340094348</sup>

[19] American Mineralogist Crystal Structure Database (AMCSD). (2024).  
*Estructura cristalina de óxido de calcio*.

[20] Bárcena Rosey, V. (2006). *Historia y actualización del ionómero de vidrio (revisión bibliográfica)*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de

[21] Blanco Lerech, S., Frías Tarón, S., Tarón Dunoyer, A., Bustillo Arrieta, J. M., & Díaz Caballero, A. (2017). *Resistencia a la compresión del ionómero de vidrio y de la resina compuesta*. Revista Odontológica Mexicana. Recuperado de <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-odontologica-mexicana-90-articulo-resistencia-compresion-del-ionomero-vidrio-S1870199X17300320>

[22] Cabrera Villalobos, Y., Álvarez Llanes, M., Gómez Mariño, M., & Casanova Rivero, Y. (2017). *En busca del cemento adhesivo ideal: los ionómeros de vidrio*. Revista Cubana de Medicina y Cirugía Dental. Recuperado de

[23] Proaño de Casalino, D., & López Pinedo, M. (2006). *Los cementos ionómeros de vidrio y el mineral trióxido agregado como materiales biocompatibles usados en la proximidad del periodonto*. Revista Estomatológica Herediana.

[24] Polet González Cruz 2022 ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN IONÓMERO DE VIDRIO CONVENCIONAL Y UNO MODIFICADO CON RESINA

[25] R-Joya, Miryam, Raba, Angela M, & Barba-Ortega, José José. (2016). Síntesis de óxido de calcio mediante dos procesos químicos diferentes. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 20 (81), 188-192.

[26] González Mancera, G., & Noguez Amaya, M. E. (2006) Tamburi, M. M., & Sporyk, D. F. (2017). *Influence of particle size on the calcination process of limestone*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 127(1), 489- 496.

[27] Borja-Borja, J. M., & Rojas-Oviedo, B. S. (2020). Nanomateriales: métodos de síntesis. *Pol. Con.* 5(8), 426-445

[28] Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*,

[29] Rodríguez-Navarro, C., & Ortega-Huertas, M. (2009). Thermal decomposition of calcite: Mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystals. *American Mineralogist*, 94(4), 578–591.

[30]Hernández Mata, A., (2012). Comparación de la resistencia compresiva entre diferentes tipos de ionómeros de vidrio. *Odovtos - Revista Internacional de Ciencias Dentales* , (14), 55-58.

[31] Mendoza Doroteo (2003)NANOMATERIALES: nuevas propiedades a menores dimensiones

[32] Monther A. Dokhy , Ahmed A. Tahir; Propiedades mecánicas de materiales nanocompuestos con grietas. *Conferencia AIP. Proc.* 10 de febrero de 2025; 3169 (1): 040101. 2023

[33] SarithNaidu, T., Venkatasubbaiah, K. Efecto de los nanorefuerzos en la dureza y la resistencia a la corrosión de los compuestos híbridos. *JOM* **76** , 5932–5943 (2024).

[34] Junyi Gao “FABRICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE HIERRO POR MOLIENDA MECÁNICA CON INTRODUCCIÓN DE PARTÍCULAS CERÁMICAS” (2015)

[35] Proaño de Casalino, D., & López Pinedo, M. (2006). Los cementos ionómeros de vidrio y el mineral trióxido agregado como materiales biocompatibles usados en la proximidad del periodonto. *Revista Estomatológica Herediana* , 16 (1), 59-63.

[36] Raisa Severino. 2016, Estudio comparativo mediante Microscopía Electrónica de dos tipos de ionómeros de vidrio sometidos a un proceso químico

[37] García Castellanos, B. (2020).Caracterización y modificación de ionómero de vidrio con nanoestructuras para mejorar las propiedades antibacterianas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

[38] Roberto C. 2011,Síntesisde CaO por el Método de Solución en Combustión y sus Propiedades Termoluminiscentes

[39] CarvajalCarvajal, Carlos. (2019). Especies reactivas del oxígeno: formación, función y estrés oxidativo. *Medicina Legal de Costa Rica* , 36 (1), 91-100.

[40] Arrieta, J., Soria, M., Ugarte, I., Moina, I., Guerra, M., & Escanero, J. (2004). "Alteraciones del pH intracelular en fibroblastos peritoneales inducida por factores implicados en la esclerosis peritoneal." *Nefrología*. Recuperado de Revista Nefrología.

[41] Baeza, Alejandro. 2005, Sensores y biosensores electrónicos. facultad de química. UNAM

[42] Alvear Pérez, Javier, Marrugo Stella, Pupo, & Andrés, Romero. (2018). Evaluación de la actividad antimicrobiana del hidróxido de calcio combinado con diferentes concentraciones de omeprazol frente a *Enterococcus faecalis*.

[43] AINIA. (2014, 3 de diciembre). Los 5 elementos clave para verificar las propiedades antimicrobianas de materiales y superficies.

[44 ] Kazi, F. M., Parvez, K., Asghar, A., Akbar, S., Jawaed, N. U., Kumar, N., & Palma, P. J. (2024). In Vitro Evaluation of the Influence of Biosynthesized Calcium Oxide Nanoparticles on the Antibacterial Activity, pH, Microleakage and Cytotoxicity of Conventional Intracanal Medicaments. *International journal of molecular sciences*,

[45] Prashant Dahal2023, *Enterococcus faecalis: A Comprehensive Guide*

[46] Clinical and Laboratory Standards Institute (2015). *Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests; Approved Standard—12th ed.* CLSI document M02-A12

[47] Rodriguez, M. J. (2022). Resistencia antibiótica y cavidad oral. *O.V.*, 2(37),3–7.

[48] Pérez, A., & Torres, C. (2023). Pathogenic Potential and Antibiotic Susceptibility: A Comprehensive Genomic Analysis of *Enterococcus faecalis*. *Pathogens*, 13(1), 36.

[49] Murray, B. E., & Ayers, S. J. (2021). Antimicrobial Susceptibility Testing for Enterococci: Manual and Automated Methods. *Journal of Clinical Microbiology*, 59(4), e00843-21.

[50] Khan, S., & Ahmad, I. (2010). Antimicrobial resistance of *Enterococcus* species isolated from clinical samples: an evaluation by broth microdilution method. *Journal of Medical Microbiology*