



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Colegio De Ingeniería Química

Tesis

**“Evaluación fotocatalítica de Ca(OH)_2 obtenido a partir
del cascarón del huevo”**

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:

Iván Josué Guridi Domínguez

Director de TESIS:

Dr. Adan Luna Flores

Co-Director:

Mtro. Jaime Díaz Altamirano

Puebla, Pue. Agosto 2025



Autorización de Impresión de Tesis

Ingeniería Química (X)

Ingeniería Ambiental ()

Ingeniería en Alimentos ()

Ingeniería en Materiales ()

Matrícula: 201831888A.C. Sustentante Iván José Guridi DomínguezDe acuerdo a la **presentación y revisión** de la tesis:Evaluación fotocatalítica de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obtenido a
partir del cascarrón del huevo

se aprueba la impresión y empastado de la misma.

Jurado de examen profesional:

Firma

Presidente: Dr. Marco Antonio Morales SanchezSecretario: Dr. Tenaro Leonrado Varela CorderoVocal: Dr. Adán Luna FloresFecha de examen: 17 / Junio / 2025H. Puebla de Zaragoza a 17 de Junio de 2025.



Oficio No. FIQ/AC/064/2025
Asunto: Registro de Tema de Tesis.

C. IVÁN JOSUÉ GURIDI DOMÍNGUEZ
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Química cuyo título es el siguiente:

"Evaluación fotocálitica de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a partir del cascarón del huevo"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. Adán Luna Flores.
Co-Director de Tesis: Mtro. Jaime Díaz Altamirano

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO**

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Zaragoza, 2 de Junio de 2025


Dr. Rubén Jonatan Aranda García
Secretario Académico



C.c.p. Director de Tesis: Dr. Adán Luna Flores.
C.c.p. Co-Director de Tesis: Mtro. Jaime Díaz Altamirano.
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72580
01 (222) 229-5500
Ets. 7250 y 7251

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental a lo largo de esta etapa. Su amor incondicional, apoyo constante y palabras de aliento me han sostenido en los momentos más desafiantes. A mis padres, gracias por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi asesor de tesis, por su guía, paciencia y compromiso durante todo este proceso; su orientación académica y confianza en mi trabajo fueron clave para alcanzar esta meta. Extiendo también mi gratitud a los miembros del jurado sinodal, quienes con su tiempo, observaciones y experiencia enriquecieron este proyecto y contribuyeron a su consolidación. Finalmente, agradezco a mis amigos, quienes, con su compañía, ánimo y comprensión me ofrecieron momentos de descanso, motivación y fortaleza a lo largo del camino. A todos ustedes, gracias por formar parte de este logro.

Contenido

Introducción.....	7
Objetivo General.....	8
Hipótesis	8
Capítulo 1: Antecedentes.....	9
1.1 Consumo del huevo.....	10
1.2 Contaminación producida por el cascaron del huevo.	11
1.3 Materiales derivados de residuos: oportunidades en fotocátalisis	11
1.4 Fotocatálisis Heterogénea	12
1.5 Uso del cascarón de huevo	14
1.6 Obtención de hidróxido de calcio	16
1.7 Síntesis asistida con microondas.....	17
Capítulo 2: Metodología	19
2.1 Obtención del polvo de cascarón de huevo	20
2.2 Obtención de hidróxido de calcio	21
2.3 Degradación de muestras en azul de metileno	23
2.4 Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-VIS).....	25
2.5 Difracción de Rayos X (DRX).....	26
2.6 Espectroscopia de reflectancia difusa (DRS).....	26
2.7 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	27
Capítulo 3: Resultados y Discusión.....	28
3.1 Resultados DRX	29
3.2 Resultados de DRS	30
3.3 Resultados de SEM.....	32
3.4 Comparación de los polvos obtenidos mediante reacciones químicas y síntesis asistida con microondas.....	34
3.5 Evaluación fotocatalítica del polvo obtenido.	35
3.6 Comparación de polvos para degradar.....	39
3.7 Análisis de muestras en el UV-Vis.....	39
3.8 Comprobación del tratamiento en microondas	43
Conclusiones	48
Bibliografía.....	49

Introducción.

El presente trabajo tiene la finalidad de exponer una investigación sobre el empleo del cascarón de huevo para la obtención de un material $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ que nos ayude en la eliminación de un colorante (azul de metileno); pues en la actualidad el manejo de los residuos orgánicos representa un desafío ambiental significativo entre otros lo es el cascarón de huevo, pues es un hecho que en los contextos urbanos la generación de desechos tanto orgánicos como inorgánicos es constante y creciente. Dentro de los residuos orgánicos, el cascarón de huevo destaca como uno de los subproductos más abundantes, a pesar de su enorme potencial de aprovechamiento.

De acuerdo con la estadística del año 2023 de la revista global de avicultura, se indicó que México es el principal consumidor de huevo a nivel mundial, pues debido al alto consumo se alcanzó un promedio anual de 23 kilogramos por persona, con una proyección de 32.92 kilogramos por persona para el año 2030; por lo que se generaron grandes volúmenes de residuos de cascaron y se generará aún más para el año señalado.

El desechar inadecuadamente el cascarón de huevo no solo contribuye a la contaminación ambiental, sino que también suele ser un foco de infecciones bacterianas, como las que provocan la salmonella, además también es un factor en la proliferación de plagas. Sin embargo, más allá de ser un desecho, el cascarón de huevo es una fuente rica en calcio y carbono, dichos elementos pueden ser aprovechados en aplicaciones industriales y ambientales.

En este contexto, con la presente investigación se busca darle un segundo uso al cascarón de huevo mediante su transformación en hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ a través de un proceso asistido por microondas. El objetivo es evaluar su eficacia en la degradación fotocatalítica de colorantes, un proceso que ha demostrado ser efectivo en la remediación de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. Si bien existen investigaciones previas que han empleado óxido de calcio derivado del cascarón en procesos fotocatalíticos, los métodos convencionales requieren altas temperaturas y tiempos prolongados, lo que incrementa los costos energéticos para su obtención.

En cambio, a través de la síntesis asistida por microondas que se propone en esta investigación, se pretende ofrecer una alternativa más eficiente y sostenible, al tiempo que contribuye a la reducción de residuos y a la mitigación del impacto ambiental. El aprovechamiento del cascarón de huevo como material base para obtener compuestos con aplicaciones fotocatalíticas podría representar una solución innovadora y accesible para enfrentar problemas ambientales relacionados con la contaminación de aguas y el manejo inadecuado de residuos orgánicos.

Objetivo General

- Evaluar la actividad fotocatalítica del Ca(OH)_2 obtenido del cascarón del huevo mediante síntesis asistida con microondas.

Objetivos específicos:

- Obtener, mediante síntesis asistida con microondas, Ca(OH)_2 a partir del cascarón del huevo.
- Caracterizar los materiales: cascarón de huevo y Ca(OH)_2 por DRX, DRS.
- Evaluar la actividad fotocatalítica del Ca(OH)_2 obtenido, durante la degradación del azul de metileno.

Hipótesis

Es posible obtener Ca(OH)_2 del cascarón del huevo en una síntesis asistida con microondas y que además presente buena actividad fotocatalítica en la degradación de azul de metileno.

Capítulo 1: Antecedentes

1.1 Consumo del huevo.

Es sabido que en México se consume mucho el huevo en sus diferentes variedades, por lo que la producción de huevo para consumo humano cada vez tiene más demanda, y éste se incrementó en casi 3% en el año 2023. Pues de acuerdo con las dependencias gubernamentales como la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y/o el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera han informado que la producción de huevo en México para consumo gastronómico se ubicó en 3.1 millones de toneladas al finalizar el año 2022, es decir, 1.81% más en comparación con los 3 millones de toneladas del año 2021. Además, se explicó que el huevo para plato tiene una participación nacional en la producción pecuaria de 12.6% y un consumo anual per cápita de aproximadamente 24 kilogramos. **(Forbes Staff, 2023)**.

En el año 2023 México se convirtió en el país que más consumió huevo, actualmente el promedio por persona es de 23 kilos por año, lo que equivale a 392 unidades aproximadamente **(Gutiérrez, 2023)**. Y de acuerdo con la Figura 1 se prevé que para el año de 2030 se llegue a un promedio por persona de 32.92 kilogramos, lo que es un equivalente a 527 unidades aproximadamente, lo que sería un consumo de 1 huevo y medio al día **(Mendoza Rodríguez, Brambila Paz, Arana Coronado, Sangerman Jarquín, & Molina Gómez, 2016)**.

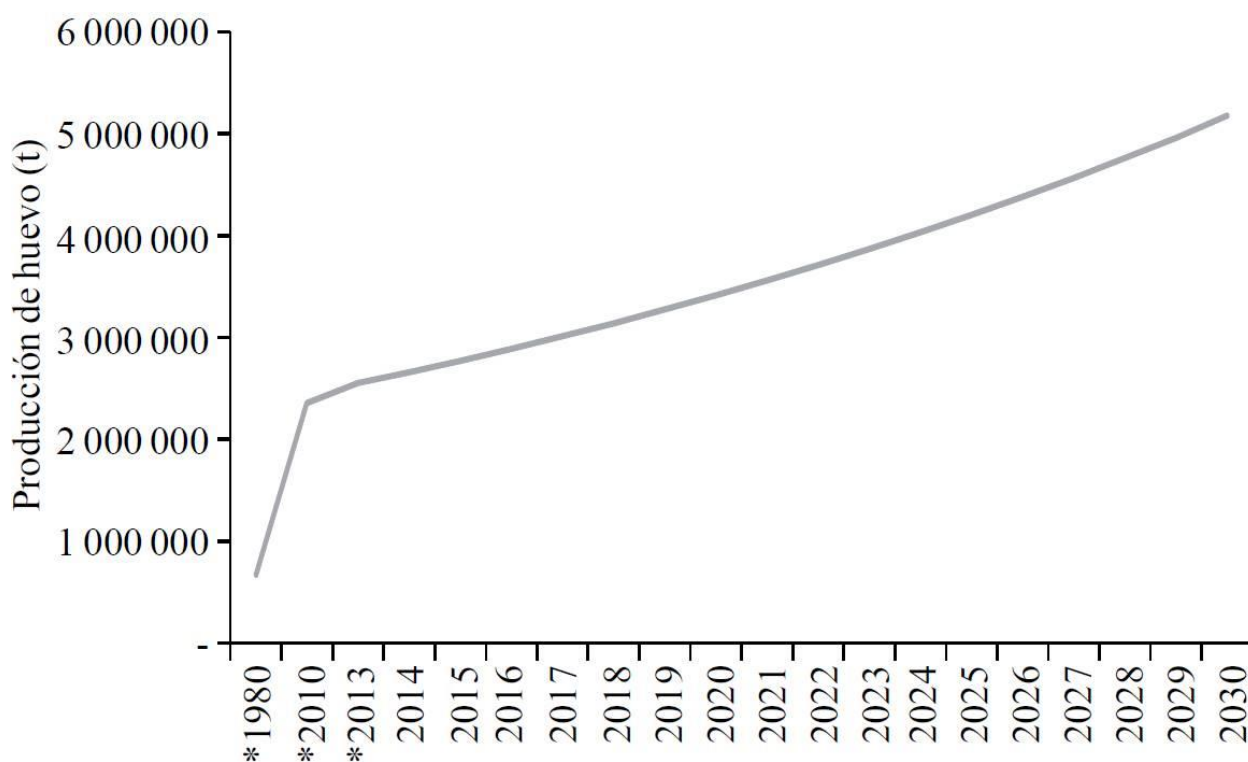


Figura 1. Estimación de producción del huevo en toneladas. Tomada de (Mendoza Rodríguez, Brambila Paz, Arana Coronado, Sangerman Jarquín, & Molina Gómez, 2016)

1.2 Contaminación producida por el cascaron del huevo.

Como ya se mencionó anteriormente, en la sociedad mexicana se consume mucho huevo, lo que provoca que surjan muchos residuos de éstos; pero la mayoría de las personas no saben cómo dar un uso al cascarón del huevo o donde llevarlo para poder aprovecharlo.

A través de diversos estudios se ha observado que en los lugares donde lo llegan a desechar como en vertederos o ríos, llega a generar contaminación surgiendo la presencia de infecciones como la salmonela y demás microorganismo, además se provoca la presencia de roedores que pueden llegar a tener infecciones como rabia, entre otras plagas que pueden afectar a la población cercana a estos lugares. **(Jayarao, Patterson, Wallner-Pendleton, Kariyawasam, & Denagamage, 2015).**

Además, desde el origen de la producción del huevo, el cascarón se contamina con microorganismos en la superficie externa, por ejemplo con materia fecal de la misma gallina, Salmonella, materiales del nido, alimento, e incluso con el aire que circula entre otros. Dependiendo del nivel de contaminación, cada cáscara puede tener hasta 107 bacterias como son: Pseudomonas, alcaligenes, Proteus, Citrobacter, Esc. Coli, Enterobacter, Enterococcus, Micrococcus y Bacillus. Las bacterias, sobre todo las gramnegativas móviles, pueden entrar a través de los poros de las cáscaras de huevo, sobre todo si están húmedas **(Deutsche Química S.A., 2020)..**

1.3 Materiales derivados de residuos: oportunidades en fotocátalisis

Los materiales derivados de residuos han ganado cada vez más atención en los últimos años debido a su gran potencial y a su naturaleza respetuosa con el medio ambiente, sin embargo, casi no se ha dedicado ninguna revisión específicamente a los materiales fotocatalíticos moldeados o derivados de residuos.

La fotocátalisis y el diseño inspirado en los residuos biológicos producen materiales notablemente respetuosos con el medio ambiente. Por lo tanto, su combinación o asociación puede abrir posibilidades prometedoras en la valorización de residuos y procesos fotocatalíticos, lo que a su vez conducirá a un desarrollo sostenible a escala global, el potencial de un pleno uso de fuentes de energías renovables, biomasa y luz solar.

La catálisis es uno de los 12 principios de diseño de la química verde que resalta el cambio de paradigma en el concepto de eficiencia de reacción, como concepto sobre el rendimiento químico que promueve la minimización de residuos. Además, se deben tener en cuenta varios conceptos para lograr un proceso catalítico verde eficaz, donde la energía consumida en una reacción y la sostenibilidad de los materiales catalíticos

suelen analizarse como cuestiones relevantes (Rodríguez Padrón, Luque, & Muñoz Batista, 2019).

1.4 Fotocatálisis Heterogénea

La fotocatálisis heterogénea es una reacción basada en la generación de iones hidroxilo obtenidos mediante reacciones de oxidación-reducción que ocurren en la superficie de un fotocatalizador debido a la acción de los rayos UV y la presencia de un agente oxidante como el oxígeno presente en el aire o peróxido de hidrógeno. La reacción sucede en la región interfacial, producida entre el sólido excitado y la solución, donde tienen lugar las reacciones de destrucción de contaminantes, independientemente de que el fotocatalizador sufra modificaciones químicas. El fotocatalizador puede tener una morfología para aumentar el área de acción o inmovilizado sobre algún soporte para evitar un paso de separación posterior y permitir también su reutilización. **(Hincapié Mejía, Ocampo, Restrepo, & Marín, 2011)**

Las técnicas de degradación donde hay una reacción de oxidación se basan en procesos capaces de provocar cambios significativos en la estructura de los contaminantes. Estas técnicas favorecen la formación de radicales hidroxilo altamente capaces de destruir una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos, como es el ion cianuro (CN^-) comúnmente en efluentes de la minería. Este radical es un potente oxidante capaz de degradar muchos compuestos orgánicos en dióxido de carbono, agua, sales minerales y puede generarse por medios fotoquímicos o por otras formas de energía.

Los componentes necesarios para realizar la reacción de fotocatálisis son: un compuesto a degradar, un compuesto oxidante como es el oxígeno contenido en el aire, un medio donde se produce la reacción, un fotocatalizador como es el hidróxido de calcio y una fuente de luz ya sea natural o artificial como se muestra en la Figura 2. La eficiencia y aplicación exitosa de la fotocatálisis requiere que el contaminante, el catalizador y la fuente de iluminación estén en estrecho contacto entre sí. La principal ventaja de la fotocatálisis heterogénea es su incorporación de energía solar en forma de fotones solares, por lo que el proceso de degradación adquiere un valor adicional significativo. En la fotocatálisis heterogénea, el fotocatalizador, que generalmente es un sólido o semiconductor de banda ancha absorbe directa o indirectamente energía visible o ultravioleta. En su forma excitada actúa como catalizador sin sufrir modificaciones químicas, y entre el catalizador excitado y la disolución se produce degradación y/o eliminación de contaminantes. (Miriam , 2021)

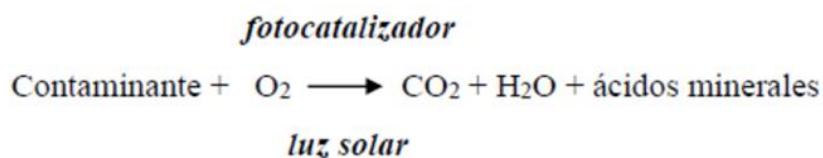


Figura 2. Componentes necesarios para la reacción de fotocatalisis. Tomada de (Miriam , 2021)

La fotocatalisis heterogénea es un proceso químico catalizado por un sólido, donde la muestra foto excitada genera electrones y huecos, como se puede observar en la Figura 3. Los electrones y los huecos pueden iniciar una vía de reacción reductiva y oxidativa. Además, la recombinación de electrones y huecos y la pérdida de energía resultante durante el proceso generalmente reducen la fotoactividad de la muestra. Los electrones y los huecos generados pueden iniciar una amplia gama de reacciones tanto en medios gaseosos como líquidos, que incluyen la producción de vectores energéticos, la síntesis orgánica selectiva de productos de alto valor y la eliminación/degradación de sustancias químicas no deseadas y patógenos microbianos en el aire y el agua. (Rodríguez Padrón, Luque, & Muñoz Batista, 2019)



Figura 3. Representación esquemática de las aplicaciones potenciales de los residuos para el diseño de materiales fotocatalíticos. Tomada de (Rodríguez Padrón, Luque, & Muñoz Batista, 2019).

1.5 Uso del cascarón de huevo

El cascarón de huevo se encuentra compuesto por materiales cerámicos que tienen propiedades estructurales y mecánicas de biomineralización que consta de dos fases, orgánica y mineral; la fase orgánica está compuesta principalmente por proteínas, lípidos, proteoglicanos y glicoproteínas, y constituye un porcentaje de entre el 3 al 3.5% del peso total de la cáscara; la fase mineral corresponde al 95.00 % aproximadamente del peso de la cáscara, en la que se encuentran compuestos como el calcio, que es secretado en solución por células particulares del organismo de la gallina, mismas que se cristalizan y se estructuran para formar el cascarón (Beltrán Ramírez, González Fino, & Hernández Gómez, 2021)..

La cáscara del huevo de las aves es una cubierta protectora natural que depende del fenómeno de la biomineralización para su formación, la que está formada por carbonato de calcio en forma de calcita que contiene cientos de proteínas, la que con la fase mineral que controla su formación y su estructura, determina las propiedades mecánicas del biomaterial. (Gautron, y otros, 2021)

Se sabe que la composición exacta del cascarón de huevo es un 2% de agua y un 98% de materia seca; a su vez la materia seca se compone de un 5% de proteína cruda y un 93% de cenizas, y ese 93 por ciento de ceniza se compone de carbonato de calcio que corresponde de un 94% a un 98% de su peso total, como se puede observar en la Figura 4. (Bedoya Salazar & Valencia González, 2020).

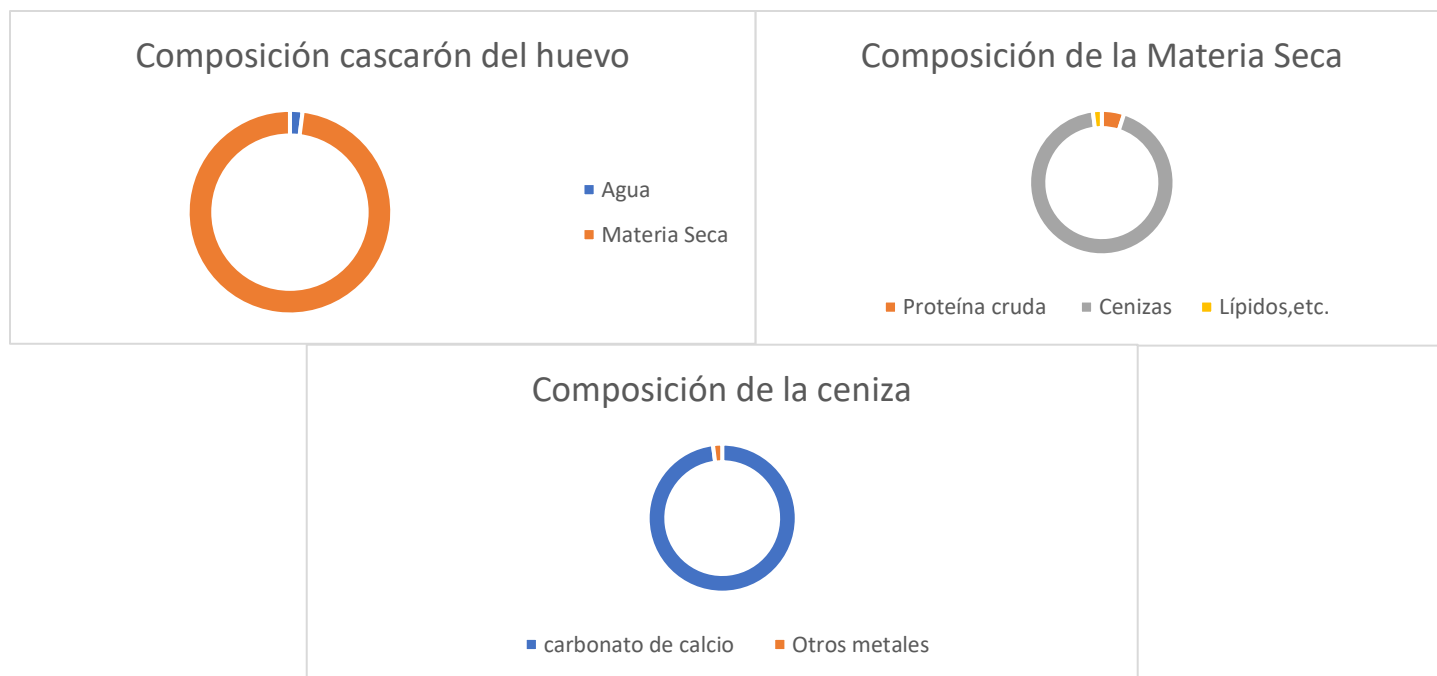


Figura 4. Composición del cascarón de huevo [Elaboración propia].

También se han hecho comparaciones entre el cascarón de huevo blanco y el marrón, con la finalidad de observar sus diferencias con respecto a su contenido, encontrando los siguientes resultados (ver Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1 Estado nutricional de la cáscara de huevo en polvo, parte 1

	Polvo de cáscara de huevo blanco	Polvo de cáscara de huevo marrón.
Humedad (%)	0.46	0.20
Proteína (%)	3.92	5.04
Cenizas (%)	94.61	94.28

Nota: El porcentaje restante de la tabla para llegar al 100% son de lípidos, proteoglicanos y glicoproteínas. Adaptada de (Ray, Barman, Roy, & Singh, 2017)

Tabla 2 Estado nutricional de la cáscara de huevo en polvo parte 2

	Polvo de cáscara de huevo blanco	Polvo de cáscara de huevo marrón
Calcio (%)	34.12	33.13
Magnesio (%)	0.29	0.36
Fósforo (%)	0.04	0.07
Potasio (%)	0.03	0.04
Sodio (%)	0.05	0.04
Cobre (ppm)	< 1 ppm	<1ppm
Hierro (ppm)	22 ppm	< 1 ppm
Manganeso (ppm)	< 1 ppm	< 1 ppm
Zinc (ppm)	< 1 ppm	< 1 ppm

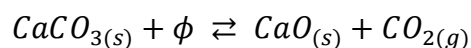
Nota: El porcentaje restante que es menor al 65.47% corresponde al Carbono. Adaptada de (Ray, Barman, Roy, & Singh, 2017)

1.6 Obtención de hidróxido de calcio

Existen antecedentes de otros estudios donde se ha visto que han utilizado el cascarón de huevo como precursor para obtener óxido de calcio a través del carbonato de calcio del cascarón.

El óxido de calcio es un producto alcalino que permite regular multitud de procesos industriales y sus propiedades, principalmente a partir de su composición química y del tratamiento térmico al que ha sido sometido el mineral, determinando su grado de reactividad (Calcinor, 2020).

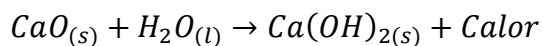
Para obtener el óxido de calcio (CaO) se tiene que realizar una reacción de calcinación, (Φ) para ello, el carbonato de calcio (CaCO₃) se descompone mediante una reacción endotérmica de acuerdo con la ecuación indicada como número 1:



Ecuación 1.

La calcinación es una reacción de descomposición térmica, pues a través del calor aportado el Carbonato de Calcio se descompone resultando como producto Óxido de Calcio y Dióxido de Carbono. (Caleras San Juan, 2016)

Una vez obtenido el óxido de calcio, este se degrada en el líquido contaminado, donde se puede observar que el óxido de calcio reacciona con el agua surgiendo otra reacción en el proceso ecuación 2; ya que si se trabaja a temperatura y presión ambiental el óxido de calcio reacciona violentamente con el agua, pues se eleva su temperatura a los 90 °C. formando así hidróxido de calcio, también llamada cal apagada, o Ca(OH)_2 . (quimica.es, s.f.)



Ecuación 2.

Pero el mayor problema u obstáculo para poder fabricar cal (CaO) a través del carbonato de calcio es que se necesitan altas temperaturas para poder obtenerla, lo que eleva su costo de producción pues se necesita que se calcine el compuesto a temperaturas de alrededor de los 900°C. (MITECO, 2019).

También se han realizado pruebas para extraer el calcio del cascarón del huevo a través de tratamientos de calcinación a 800°C y aplicando soluciones de ácido clorhídrico y/o ácido acético. (Vázquez Martínez, Henkel García, Legorreta García , Barrientos Hernández, & Urbano Reyes, 2021).

Con base en los estudios mencionados sobre Fotocatálisis Heterogénea (Hincapié Mejía y de Rodríguez Padrón), se encontraron otros medios para degradar colorantes, por ejemplo, un estudio donde usaron Nanopartículas de oxihidróxido de calcio (CaO/Ca(OH)_2): Síntesis, caracterización y evaluación de su capacidad para degradar herbicidas a base de glifosato (Cabrera Penna & Rodríguez Páez, 2020). El estudio demuestra que las nanopartículas de CaO/Ca(OH)_2 pueden ser utilizadas para degradar moléculas contaminantes como el glifosato, lo que sugiere que un proceso similar podría aplicarse a la degradación de colorantes, por lo que se puede sintetizar Ca(OH)_2 a partir del cascarón de huevo y aplicar el material en la degradación fotocatalítica de colorantes. Jinmeng , y col. nos demuestra que el Ca(OH)_2 ayuda en la degradación de compuestos orgánicos como colorantes, herbicidas y contaminantes industriales (Jinmeng , y otros, 2021). Al igual Kaifeng y col. Que confirman que se puede eliminar el azul de metileno utilizando biocarbón modificado con Ca(OH)_2 derivado de paja de arroz (Kaifeng, y otros, 2023), por lo que en el presente trabajo se realiza la obtención de hidróxido de calcio a partir del cascarón de huevo a través de la síntesis asistida con microondas.

1.7 Síntesis asistida con microondas

La síntesis asistida con microondas se utiliza para facilitar la reacción, pues se ha observado que ayuda en la velocidad y eficiencia de muchas reacciones. Esta técnica

proporciona energía térmica en la reacción de manera homogénea, obteniendo ventajas como el ahorro de tiempo y energía, la generación de menos subproductos, la optimización de rendimientos, la obtención de productos en un menor número de pasos; sin contar que es una alternativa que apoya el desarrollo de nuevas líneas de investigación mediante la optimización de condiciones.

El tratamiento en microondas proporciona energía por medio de radiación electromagnética (alrededor de 900MHz), utilizando la propiedad de algunas moléculas que transforman la energía electromagnética en calor, esto se debe a que la radiación electromagnética provoca la rotación de los dipolos moleculares dentro del líquido y eso provoca que las moléculas polares se alineen y luego se relajen en el campo oscilante de la radiación electromagnética. Cuando la energía de la rotación de esos dipolos se disipa se produce el calentamiento del líquido, por eso se obtiene el calentamiento en el interior del líquido y no se transfiere a el vaso, es por lo que el líquido se halla a mayor temperatura que el recipiente. En la Figura 5 se observa un esquema de un reactor de microondas para síntesis de materiales. (Zavala Segovia, 2015).

La síntesis asistida con microondas se ha empleado para obtener una gran variedad de materiales, por ejemplo, se ha usado para obtener nanopartículas de plata (Mital & Kalpna , 2023), nanopartículas magnéticas de óxido de hierro (Manjeet S., Tomer, & Duhan, 2018), y 1,4-didropiridinas (Vala & Patel, 2023); entre otros.

Por lo que en esta investigación también se usó la síntesis asistida con microondas, para facilitar la reacción de obtención de hidróxido de calcio a partir del cascarón de huevo.

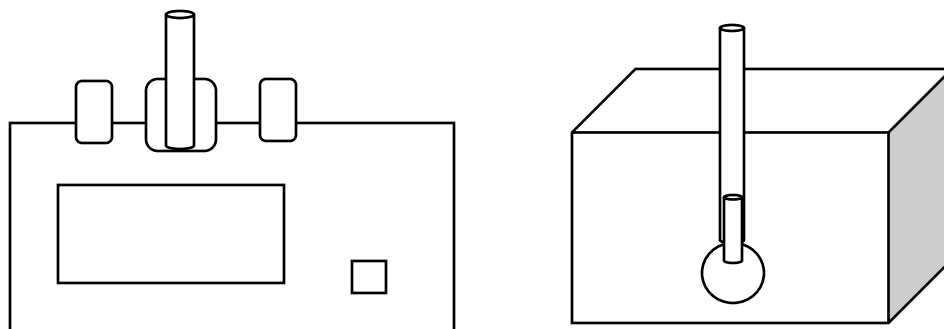


Figura 5. Equipo de microondas para la obtención de hidróxido de calcio. [Elaboración propia].

Capítulo 2: Metodología

2.1 Obtención del polvo de cascarón de huevo

En el proceso de investigación se pudo observar que las diferencias entre el cascarón de huevo blanco y el cascarón de huevo color marrón, es insignificante al llevar a cabo la obtención de carbonato de calcio, pues el porcentaje en la ceniza del cascarón de huevo blanco es del 99.59%, mientras que en la ceniza del cascarón de huevo marrón corresponde al 99.49%, por lo que en el presente trabajo solo se utilizó cascarón de huevo blanco.

La preparación del cascarón de huevo se realizó de esta manera:

1. Selección del cascarón y lavado (para eliminar los contaminantes de la capa externa del cascarón).
2. Secado por exposición al sol durante un día.
3. Separación de la membrana del cascarón ya seco.

Enseguida se colocó el cascarón en un molino de bolas rotatorio, como se muestra en la Figura 6, para iniciar un proceso de triturado y así poder obtener un polvo fino.

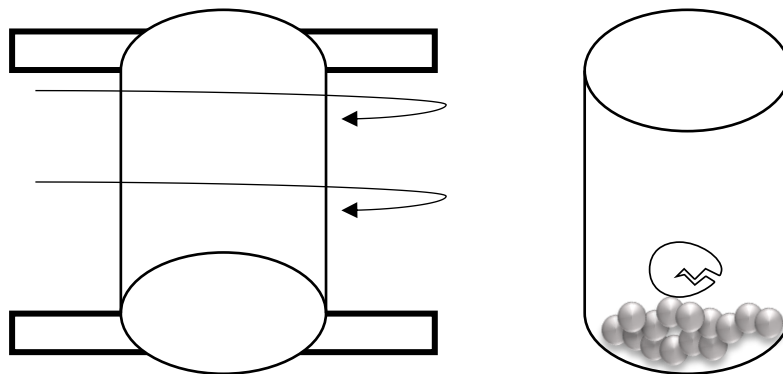
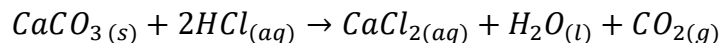


Figura 6. Molino de bolas rotatorio. [Elaboración propia].

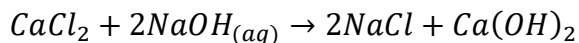
2.2 Obtención de hidróxido de calcio

Una vez obtenido el polvo del cascarón, se llevó a cabo la reacción con el cascarón de huevo (carbonato de calcio $[CaCO_3]$) y el ácido clorhídrico (HCl), y así se obtuvo cloruro de calcio ($CaCl_2$), de acuerdo con la ecuación 3.



Ecuación 3

Con el cloruro de calcio obtenido, se procedió a obtener hidróxido de calcio mediante una reacción de sustitución, la cual se especifica en la ecuación 4; el presente experimento se hizo en un medio acuoso, con un tratamiento térmico en microondas para poder obtener mejores resultados de hidróxido de calcio.



Ecuación 4.

Al no existir información sobre las condiciones de obtención de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, se decidió hacer un diagrama de acuerdo con la reacción estequiométrica de la ecuación 3 y 4 (Figura 7).

En el diagrama de flujo que se muestra en la figura 7, se puede observar que siguiendo los pasos (1-4) se obtiene hidróxido de calcio, y que a partir del paso (5) al poner la solución en el horno de microondas se comienza a obtener hidróxido de calcio.

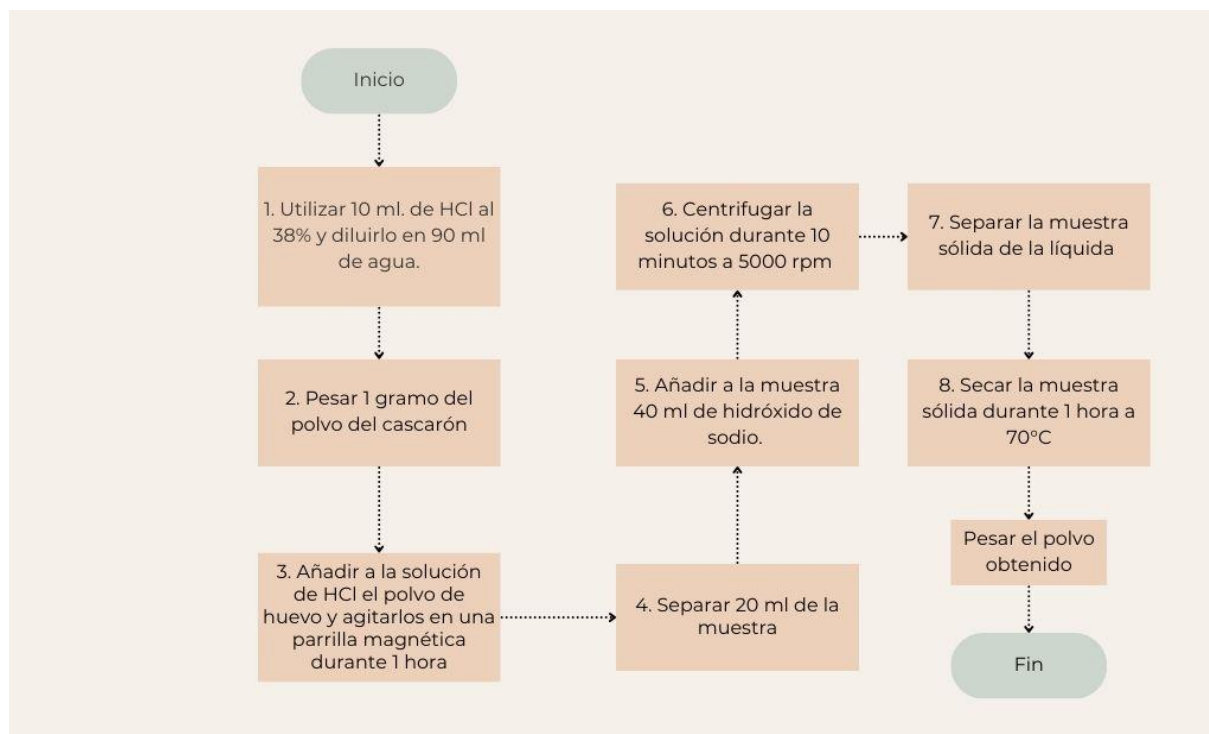


Figura 7. Diagrama de flujo para la obtención del hidróxido de calcio a partir del cascarón de huevo. [Elaboración propia].

Una vez centrifugada y seca la muestra sólida se tomaron 45 mg del polvo, con el objetivo de realizar una evaluación fotocatalítica con la degradación de una solución con 100 ml de azul de metileno a 10 ppm.

Al comprobar, mediante análisis Uv-vis, que el polvo obtenido si pudo degradar el azul de metileno, pero que se utilizaba demasiado ácido clorhídrico, pues se usaban 10 ml. de ácido clorhídrico al 38% para llegar una concentración 1.24 M (molar) y los 10 ml se desperdiciaban para 1 gramo de cascarón de huevo, y también se utilizaba más del hidróxido de sodio para obtener el polvo, se buscó mejorar el proceso, obteniendo el procedimiento mostrado en la Figura 8.

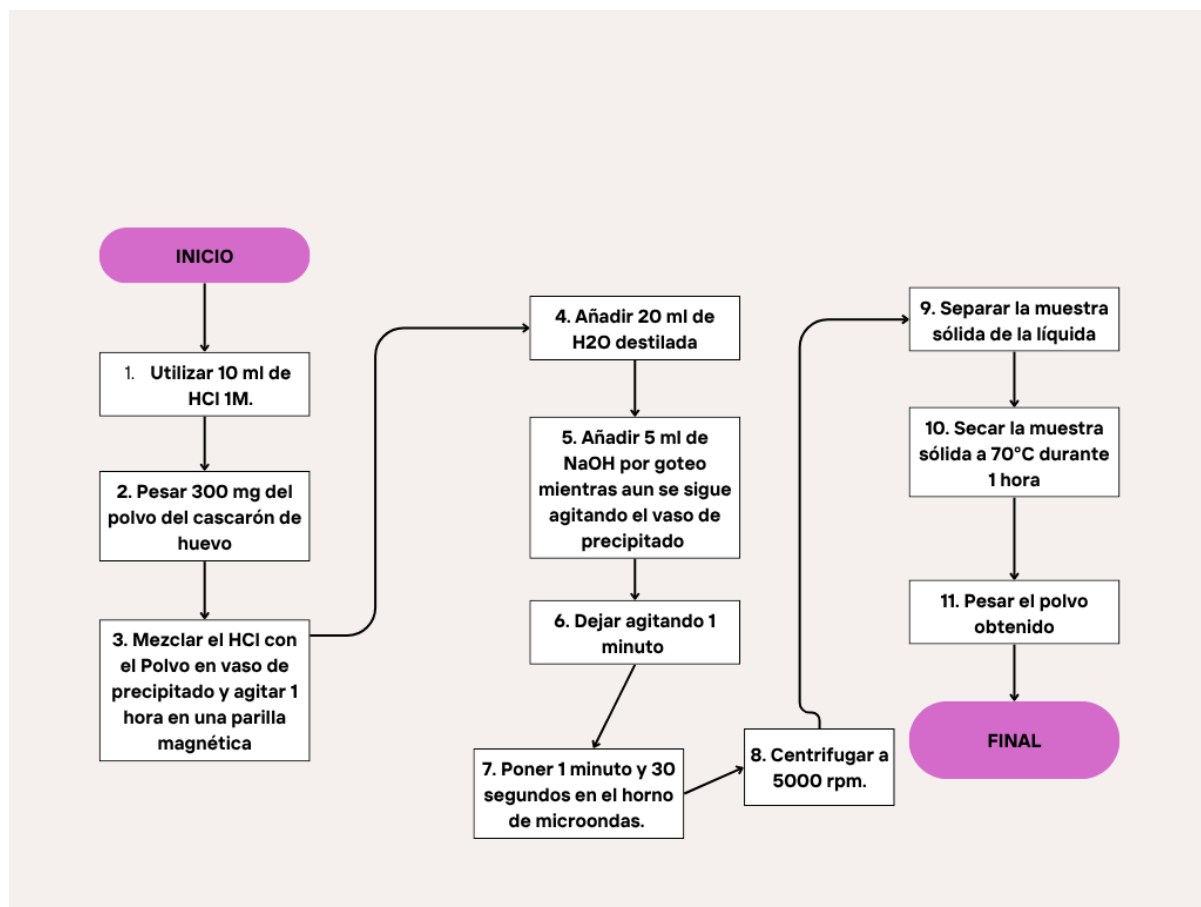


Figura 8. Diagrama de flujo de la mejora del proceso de obtención del hidróxido de calcio a partir del cascarón de huevo. [Elaboración propia].

2.3 Degradación de muestras en azul de metileno

Habiendo obtenido el polvo del cascarón de huevo se degradó en azul de metileno y se hicieron comparaciones con otras muestras para comparar su efectividad; dichas muestras comparadas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Muestras para comparar en la degradación de azul de metileno.

Muestras para comparar			
Polvo obtenido del cascarón del huevo (CaCO ₃), MCOCa	Polvo obtenido de muestras comercial de cloruro de calcio, MClCa	Cascarón de huevo con tratamiento en microondas. MCHCaMW	Azul de metileno (Blanco)

Se realizaron los experimentos 25 veces para demostrar que el polvo obtenido del cascarón de huevo y el polvo obtenido por el cloruro de calcio comercial, degradaban el azul de metileno.

Todas las comparaciones se hicieron bajo el siguiente orden.

1. Pesar 45 mg de cada polvo y dispersarlo en 100 ml de agua.
2. Utilizar 100 ml de azul de metileno al 10 ppm.
3. Mezclar ambos líquidos en un reactor fotocatalítico.
4. Suministrar aire a la mezcla con una bomba (burbujeo).
5. Exponer la suspensión a radiación solar durante 45 minutos.

Todas las veces que se realizaron los experimentos de todas las muestras se hicieron al mismo tiempo, y siempre se hicieron en los horarios de entre las 12 pm. a las 4 pm. Igualmente se comprobó a través del estado meteorológico en las horas donde era más alto el nivel de la intensidad de los rayos ultravioleta en la ciudad de Puebla, donde la medición del índice de rayos UV está en un rango de 0 a 15 como se puede observar en la Figura 9, en cambio en los días nublados o inicio de la mañana los índices de rayos son en un rango de 2 a 5, todo esto se comprobó en la aplicación meteorológica de la ciudad. Por lo que se decidió trabajar en índices UV de un rango de 11 a 15 que corresponde en el horario mencionado (ver Figura 10).

Nivel de radiación ultravioleta	IUV
Baja	0
	1
	2
Moderada	3
	4
	5
Alta	6
	7
Muy Alta	8
	9
	10
Extremadamente Alta	11
	12
	13
	14
	15

Figura 9. *El índice y la radiación UV en el Valle de México.* Tomada y Adaptada de (Iglesia segura, 2012).



Figura 10. *Índice Ultravioleta en Puebla, Pue.* Tomada y Adaptada de (Tutitempo Network, S.L., 2024)

Nota: Se hizo una comparación del índice de rayos UV en un mismo horario (12 pm. o mediodía), donde la imagen de la izquierda es en un día soleado y la imagen de la derecha es en un día nublado.

2.4 Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-VIS)

Para llevar a cabo el seguimiento de la degradación del azul de metileno en el agua se mandó a analizar en el espectrofotómetro UV-VIS.

Pues la espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) es un método instrumental de análisis con el objetivo de estudiar la estructura electrónica de las moléculas, especialmente aquellas que poseen sistemas conjugados de electrones como los colorantes orgánicos. Dado que el azul de metileno es un colorante con una estructura conjugada, su degradación puede ser monitoreada a través de UV-Vis, permitiendo evaluar la disminución de su concentración mediante la absorción en una longitud de onda característica (Francis, 2014).

Por lo tanto, en esta investigación se empleó UV-Vis como técnica de análisis para cuantificar la degradación del azul de metileno, proporcionando una forma eficiente y precisa de evaluar la eficacia del proceso fotocatalítico.

Las muestras que se mandaron a analizar en el UV-Vis fueron las mismas de la Tabla 3 las cuales se tomaban cada 5 minutos, durante 45 min de degradación y se almacenaban en microtubos de 1.5 ml. para poder observar su comportamiento respecto al tiempo.

También para comprobar que el tratamiento asistido con microondas presenta una mejor degradación que si no se usara se hizo una comparación con el polvo de hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo sin tratamiento con microondas, donde para ambas se tomaron 45 mg de cada muestra para la evaluación de la degradación de azul de metileno como en los demás experimentos ya mencionados en este trabajo.

2.5 Difracción de Rayos X (DRX)

Se puso en práctica el tratamiento químico y síntesis asistida con microondas y se logró transformar el carbonato de calcio del cascarón en hidróxido de calcio, para comprobar que el polvo del cascarón de huevo (carbonato de calcio) se transformó en hidróxido de calcio se llevaron 3 muestras para su análisis mediante DRX; las tres muestras de polvo que se llevaron al laboratorio fueron Carbonato de Calcio (MCOCa), El polvo obtenido del proceso del cloruro de calcio comercial más hidróxido de sodio (MCICa) y el polvo obtenido del cascarón de huevo en el proceso de añadirle ácido clorhídrico más hidróxido de sodio con el tratamiento en microondas (MCHCaMW).

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica ampliamente utilizada para analizar la estructura cristalina y la composición de materiales, debido a su capacidad para detectar interferencias constructivas y destructivas de los rayos X al interactuar con la materia. Cuando un material cristalino es irradiado con rayos X, se generan patrones de difracción específicos conocidos como difractogramas, que permiten identificar la disposición atómica y las fases presentes en el material (Douglas A., F. James, & Stanley R., 2008).

La técnica antes mencionada es esencial en el estudio de compuestos como el carbonato de calcio (CaCO_3) y el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), la que permite comparar las estructuras cristalinas de ambos compuestos (APARICIO CEJA & CARBAJAL ARIZAGA, 2010). En este estudio, se emplea DRX para verificar la transformación del carbonato de calcio del cascarón de huevo en hidróxido de calcio tras el tratamiento asistido por microondas, y compararlo con el hidróxido de calcio comercial.

2.6 Espectroscopia de reflectancia difusa (DRS)

También es importante mencionar que cuando se llevaron a analizar las 3 muestras: MCOCa, MCICa, MCHCaMW mediante DRX, también se analizaron dichos polvos

mediante DRS para evaluar si el Ca(OH)_2 obtenido a partir del cascarón de huevo muestra un comportamiento óptico similar al del producto comercial, como se menciona en el punto (2.2).

La espectrometría de reflectancia difusa es una técnica rápida y eficaz para analizar muestras pulverizadas con mínima preparación, lo que permite obtener información sobre su composición química y estructura, sin alterar significativamente su estado original. Esta técnica se basa en la interacción de la radiación infrarroja con los enlaces moleculares presentes en los materiales, proporcionando datos sobre la distribución de elementos como carbono, oxígeno, hidrógeno y calcio en los compuestos analizados.

En esta investigación, la espectrometría de reflectancia difusa se utiliza para comparar el carbonato de calcio (CaCO_3) presente en el cascarón de huevo con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) obtenido tras su tratamiento asistido por microondas. Al analizar la respuesta espectral de ambas muestras, es posible identificar cambios en la composición química y en la estructura de los enlaces moleculares, lo que permite verificar la transformación del material y su pureza.

Por lo tanto, la espectrometría de reflectancia difusa es una herramienta clave en esta investigación, ya que permite analizar de manera rápida y no destructiva las propiedades estructurales y químicas de los materiales obtenidos, asegurando su correcta identificación y caracterización (Douglas A., F. James, & Stanley R., 2008).

2.7 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Para saber si hay una diferencia en la morfología de los polvos obtenidos del hidróxido de calcio (con o sin síntesis asistida con microondas) se mandó a analizar mediante SEM.

Pues la Microscopía electrónica de barrido (SEM) es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electrodensa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 50kV; ya que se utiliza para visualizar la morfología y topografía de la superficie de materiales sólidos a alta resolución, observar el tamaño, forma y distribución de partículas en una muestra, comparar texturas superficiales entre distintos tratamientos o condiciones de síntesis, obtener imágenes tridimensionales aparentes de la superficie con gran profundidad de campo y en algunos casos, puede acoplarse a análisis químicos (como EDS) para identificar elementos presentes.

Capítulo 3: Resultados y Discusión

3.1 Resultados DRX

Para poder comprobar que el compuesto deseado es hidróxido de calcio se obtuvieron los difractogramas de DRX, las 3 muestras mencionadas (el carbonato de calcio, el hidróxido de calcio tanto el obtenido de manera de los compuestos comerciales, como el obtenido por el cascarón del huevo), estos difractogramas se muestran en la figura 11.

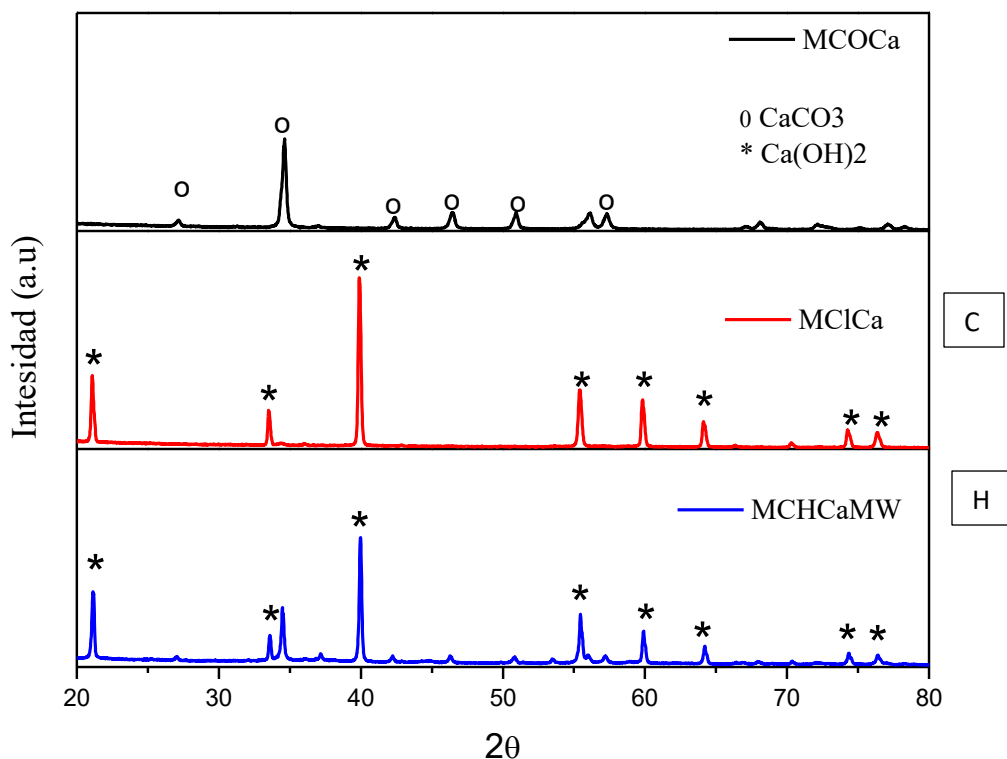


Figura 11 Comparación de las 3 muestras (DRX). La letra [C] corresponde al cloruro de calcio comercial, y el Ca(OH)₂ con el término [H] corresponde al cascarón de huevo [Elaboración propia]

Después de obtener las muestras resultantes mediante el DRX (Figura 11), se pudo comprobar que mediante la ficha PDF 98-003-7241 la presencia de CaCO₃ en la muestra de cascaron de huevo con fase hexagonal y que los picos corresponde a un valor de 2θ de 26.89 (012), 34.35 (104), 42.104 (110), 46.196 (113), 50.669 (202) y 57.110 (116) y

para ambas muestras de Ca(OH)_2 , de acuerdo con la ficha PDF 98-004-3433 obtuvo el hidróxido de calcio en fase hexagonal con los siguientes valores de 2θ : 21.15 (001), 33.94 (010), 39.95 (011), 22.63 (012), 59.87 (110), 64.24 (111), 74.42 (201) y 76.55 (112).

3.2 Resultados de DRS

Una vez comprobado que el “polvo obtenido” si degrada el azul de metileno, se mandaron analizar mediante DRS las muestras del polvo del cascarón de huevo (Carbonato de calcio), el polvo obtenido del cloruro de calcio comercial y el polvo obtenido de la reacción del casarón de huevo y el ácido clorhídrico, donde se obtuvo lo siguiente:

El análisis DRS de las muestras de cascaron y las obtenidas mediante síntesis asistida con microondas se muestran en las figuras 12 a 15. De acuerdo con las Figuras 13, 14 y 15, se pudo concluir que hay una similitud en las gráficas del hidróxido de calcio comercial y la gráfica del hidróxido de calcio del cascarón de huevo, pues las curvas son bastantes parecidas. Sin embargo, la muestra de Ca(OH)_2 proveniente del huevo (azul) tiene una absorbancia ligeramente mayor en casi todo el rango de medición, lo que puede indicar una diferencia en pureza, tamaño de partículas o presencia de impurezas.

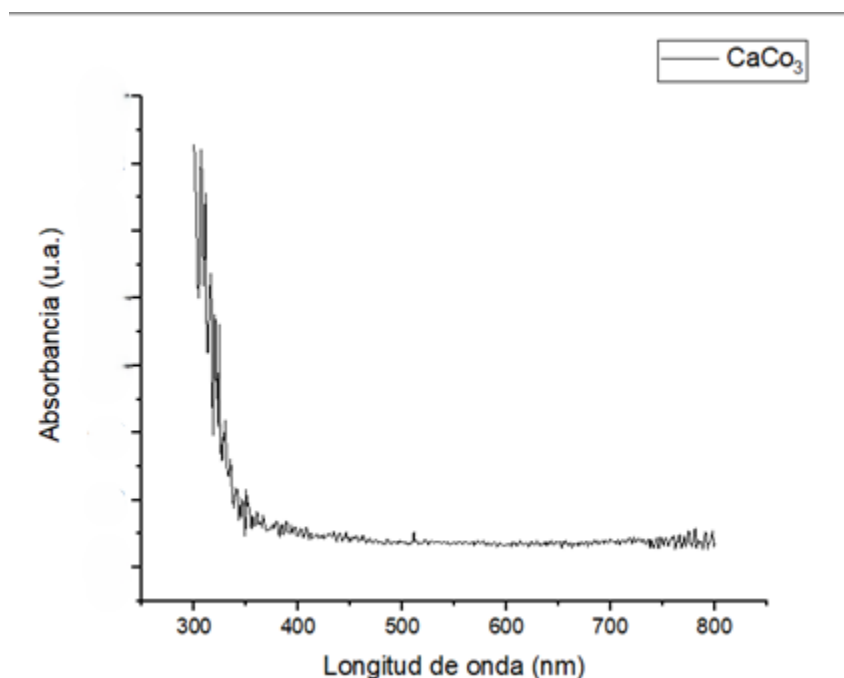


Figura 12 Análisis del DRS del carbonato de calcio a partir del cascarón de huevo.

[Elaboración propia]

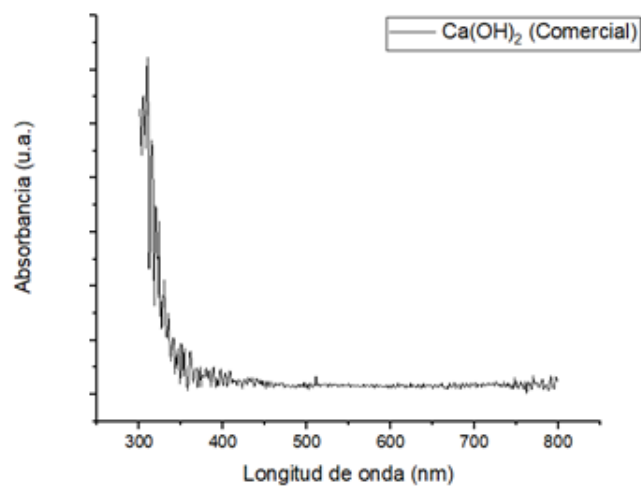


Figura 13 Análisis del DRS del hidróxido de calcio obtenido del cloruro de calcio comercial.

[Elaboración propia].

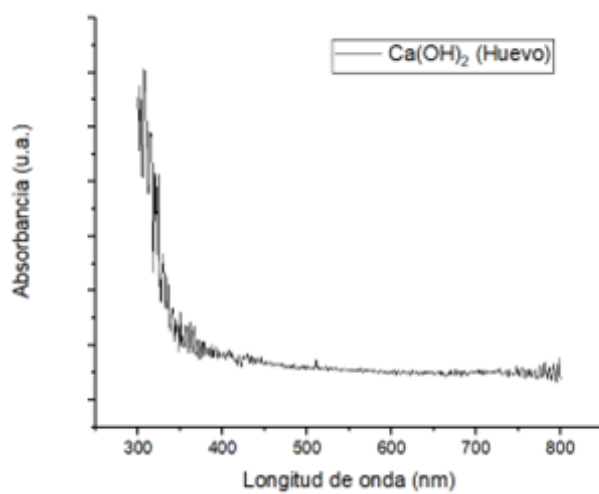


Figura 14 Análisis del DRS del hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo.

[Elaboración propia]

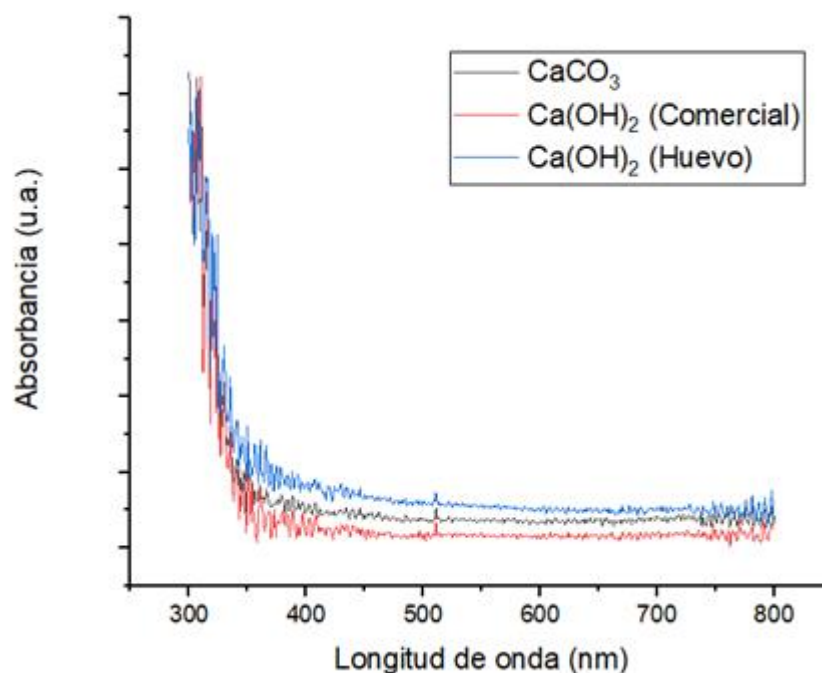


Figura 15 Comparación del DRS de las 3 muestras. [Elaboración propia]

Igualmente se pudo observar en la Figura 15, que todas las muestras absorben en la región UV. Se observa que tiene una ligera diferencia en la pendiente inicial, por lo que se puede concluir que los polvos obtenidos a partir de cloruro de calcio y del cascarón son diferentes al carbonato de calcio.

3.3 Resultados de SEM

Se mandó a analizar mediante microscopio electrónico de barrido para comprobar la morfología del hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo, con el objetivo de comparar las diferencias entre hacer o no la síntesis asistida con microondas.

Y se concluyó que el Hidróxido de calcio sin microondas (Figura 16):

- Presenta aglomerados más compactos y menos diferenciados,
- Las partículas parecen estar más agrupadas, con menor dispersión.
- Se observa una estructura más densa y con menos definición individual entre cristales.

Y del Hidróxido de calcio obtenido con síntesis asistida con microondas (Figura 17) se concluyó con:

- Las partículas muestran una morfología más definida.

- Hay mayor dispersión y separación entre aglomerados.
- La estructura parece menos compacta, lo que sugiere una mejor distribución del material y posiblemente una mayor área superficial.

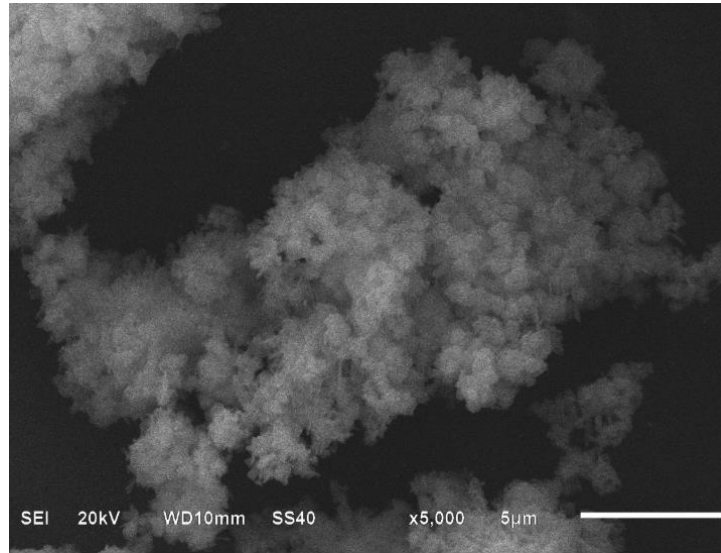


Figura 16 SEM del hidróxido de calcio sin microondas. [Elaboración propia]

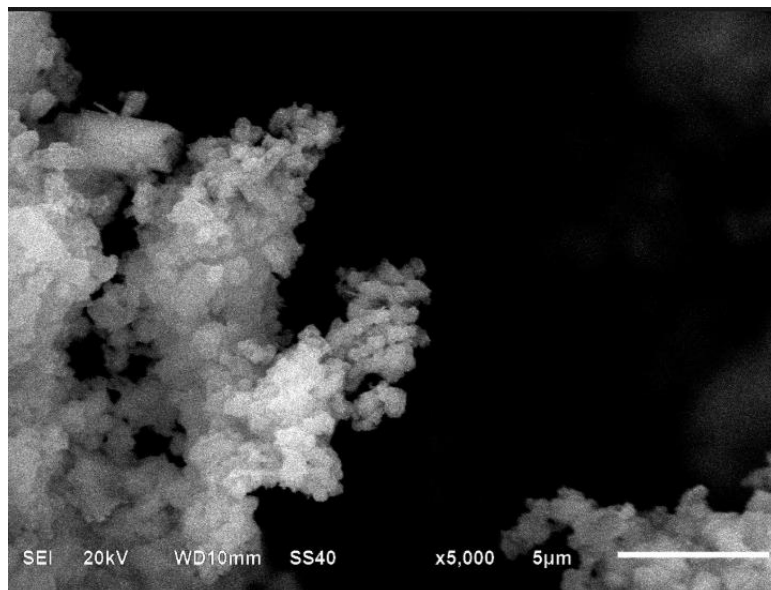


Figura 17 SEM del hidróxido de calcio con microondas. [Elaboración propia]

Las Figuras 16 y 17 demuestran que el tratamiento con microondas modificó notablemente la morfología del hidróxido de calcio, promoviendo una estructura más abierta y porosa en comparación con el método sin microondas. Esta modificación en la superficie favorece aplicaciones como la adsorción o la fotocatálisis, ya que una mayor

área superficial y mejor dispersión de partículas permiten un contacto más eficiente con los contaminantes (como colorantes).

3.4 Comparación de los polvos obtenidos mediante reacciones químicas y síntesis asistida con microondas.

Al llevar a cabo las reacciones químicas y la síntesis asistida con microondas se pudo comprobar que el polvo obtenido para degradar el azul de metileno es hidróxido de calcio, pero en esta parte de los resultados aún no se podía comprobar si el polvo obtenido era hidróxido de calcio o no, por lo que se le llamó “polvo obtenido”; y de acuerdo con el diagrama de flujo expuesto en el punto (2.2) se obtuvo lo siguiente:

1. Se pudo concluir que con los 3 métodos se puede obtener un polvo.
2. En la primera prueba donde dicho polvo conseguido de la reacción de cloruro de calcio con hidróxido de sodio dio una masa promedio de 149.2 mg. (Tabla 4)
3. En la segunda prueba realizada con el procedimiento del primer diagrama de flujo, la reacción del cascarón de huevo (carbonato de calcio) con el ácido clorhídrico e hidróxido de sodio dio una masa promedio de 143 mg. (Tabla 5)
4. Y de la tercera prueba que es de la reacción del cascarón de huevo con el ácido clorhídrico (1M) e hidróxido de sodio da una masa promedio de 123.6 mg. (Tabla 6)

Tabla 4 Obtención del polvo conseguido por CaCl_2 y NaOH (comercial)

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Masa del polvo obtenido de 250 mg de CaCl_2 y 193 mg de NaOH	144.8 mg	198 mg	104.8 mg

Tabla 5 Obtención del polvo conseguido por HCl y NaOH (cascarón de huevo)

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Masa del polvo obtenido de 20 ml del ácido clorhídrico con 1 gr del	155 mg	112 mg	162 mg

cascarón de huevo, más el hidróxido de sodio.			
---	--	--	--

Tabla 6 *Obtención del polvo conseguido por HCl (1M) y NaOH (cascarón de huevo) [proceso mejorado]*

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Masa del polvo obtenido de 10 ml del ácido clorhídrico (1M) con 300 mg. del cascarón de huevo, más el hidróxido de sodio.	130 mg	120 mg	121 mg

En todas las pruebas se logró obtener el polvo deseado, y se pudo concluir que al mejorar el proceso no era necesario utilizar demasiado ácido clorhídrico e hidróxido de sodio para obtener el producto deseado, por lo que se hicieron los demás experimentos con el diagrama de flujo número 2; por lo que se pasó a la siguiente fase, poniendo el polvo deseado a degradar en el azul de metileno.

3.5 Evaluación fotocatalítica del polvo obtenido.

Se siguió la siguiente nomenclatura para con el cloruro de calcio comercial (Co) y el cascarón de huevo (H).

Siguiendo la metodología descrita en el punto (2.3), se tomaron 45 mg de cada polvo obtenido para realizar la evaluación fotocatalítica, se degradaron las muestras con azul de metileno; se pudo observar en la prueba (Co) y (H) lograron degradar el azul de metileno como puede observarse en la Figura 18

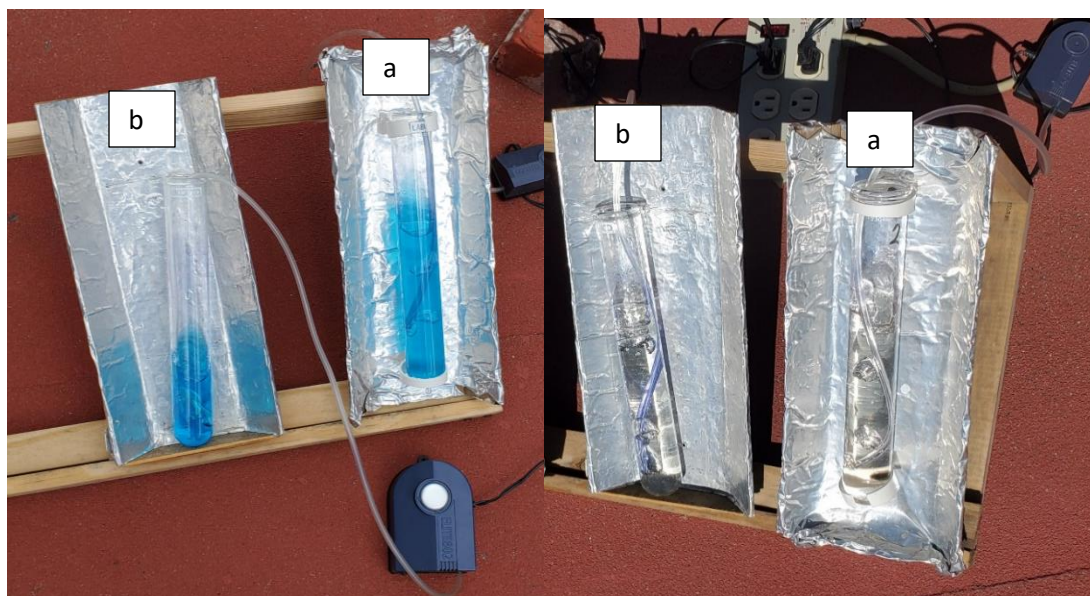


Figura 18. Prueba fotocatalítica del azul de metileno obtenido de cloruro de calcio comercial (a) y del cascarón del huevo (b) [Elaboración propia].

En la tabla 7 se observan los resultados de la degradación

Tabla 7 Comparación de muestras con el polvo obtenido

Comparación en la degradación de muestras con azul de metileno	
Muestra	Tiempo en degradar (minutos)
Prueba 1	
Cascarón del huevo	24
CaCl ₂ comercial	20
Prueba 2	
Cascarón del huevo	45

CaCl ₂ comercial	30
Prueba 3	
Cascarón del huevo	30
CaCl ₂ comercial	22

Se puede observar tanto con la figura 18 como con la tabla 7, que ambos polvos degradaron el azul de metileno.

Para la siguiente comparación, al polvo obtenido con CaCl₂ (comercial) se le asignó la letra (a), al polvo obtenido del Cascarón + HCl [1M] se le asignó la letra (b), y al polvo obtenido del Cascarón + 10 ml de HCl se le asignó la letra (c).

Tabla 8 Comparación de muestras del polvo obtenido mediante los diferentes métodos.

Comparación de muestras			
Polvo de CaCl ₂ puro (comercial) [a]	Polvo de CaCl ₂ (Cascarón + HCl [1M]) [b]	Polvo de CaCl ₂ (Cascarón + HCl 10 ml) [c]	
30	30	35	Tiempo en minutos promedio

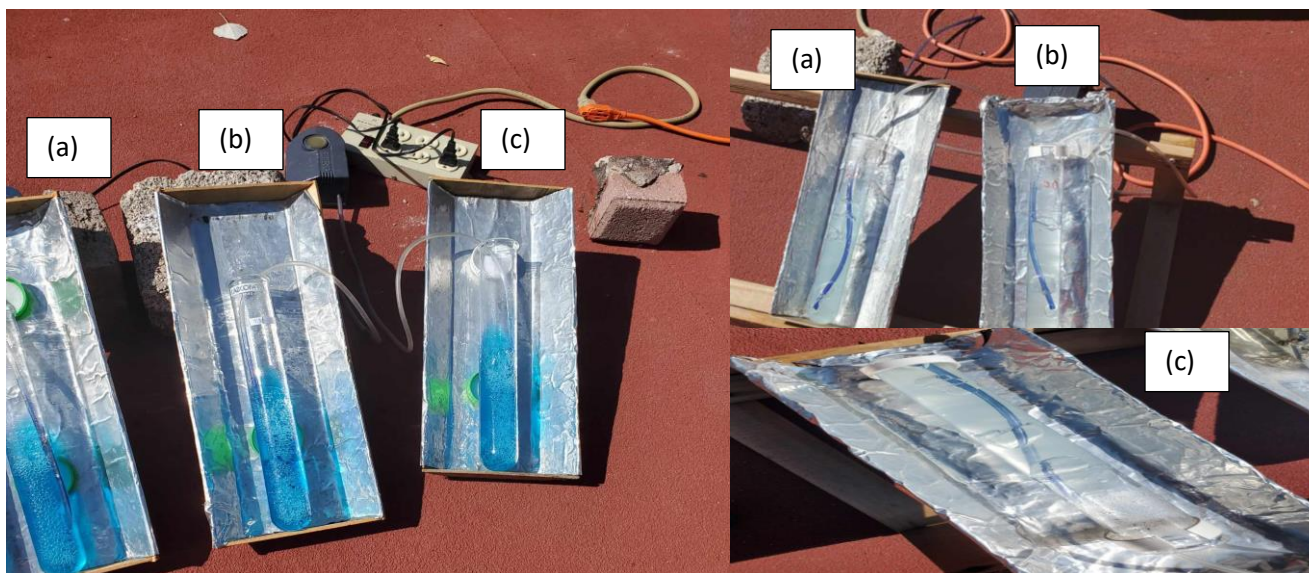


Figura 19. Prueba fotocatalítica del azul de metileno obtenido de (a), (b) y (c) [Elaboración propia].

Una vez realizados los procesos de degradación del azul de metileno se obtuvo lo siguiente: se muestra que todos los métodos pueden degradar el azul de metileno, donde el proceso de obtención del polvo a partir de cloruro de calcio comercial (a) y el proceso con el cascarón de huevo y ácido clorhídrico (1M) [b] su tiempo de degradación fue menor en comparación con el método donde se utiliza mayor ácido clorhídrico (c). (Figura 19)

Al igual se comprobó que, a menor intensidad de los rayos UV, mayor es el tiempo necesario para la degradación del compuesto.

3.6 Comparación de polvos para degradar

Para poder demostrar que el polvo obtenido es el compuesto que degrada el azul de metileno, se comparó con otros compuestos en el proceso.

Se compararon las siguientes muestras: azul de metileno puro, azul de metileno con polvo de carbonato de calcio (cascarón de huevo), azul de metileno con el polvo obtenido del cloruro de calcio comercial, y azul de metileno con el polvo obtenido a partir de cascarón de huevo agregando una solución de ácido clorhídrico uno molar (HCl 1M). Los resultados fueron los siguientes.

Tabla 9 Comparación de muestras para la fotocatálisis del azul de metileno.

	Comparación de muestras			
Muestra	Azul de metileno (Blanco)	CaCO ₃ (Carbonato de calcio)	Polvo a partir de CaCl ₂ comercial	Polvo a partir del Cascarón + HCl 1M
Tiempo en minutos promedio	----	-----	32	30

Se observó que las muestras con el polvo obtenido lograron degradar el azul de metileno, mientras que la muestra blanco (azul de metileno puro) y la que contenía polvo de cascarón de huevo no mostraron degradación del color.

3.7 Análisis de muestras en el UV-Vis.

Como se pudo comprobar la degradación de los polvos de manera visual, se analizaron las muestras para poder comprobar su comportamiento de como reaccionaban en un tiempo determinado.

Para esto se compararon las muestras que fueron: azul de metileno puro (Figura 20), azul de metileno con polvo de carbonato de calcio (cascarón de huevo) [Figura 21], azul de metileno con el polvo obtenido del cloruro de calcio comercial (Figura 22), y azul de metileno con el polvo obtenido a partir de cascarón de huevo agregando una solución de ácido clorhídrico uno molar (HCl 1M) [Figura 23], mientras sucedía la degradación, cada 5 minutos se tomaban 2 ml de líquido para analizar en UV-Vis. Los espectros de absorción se muestran en las figuras 20 a 23.

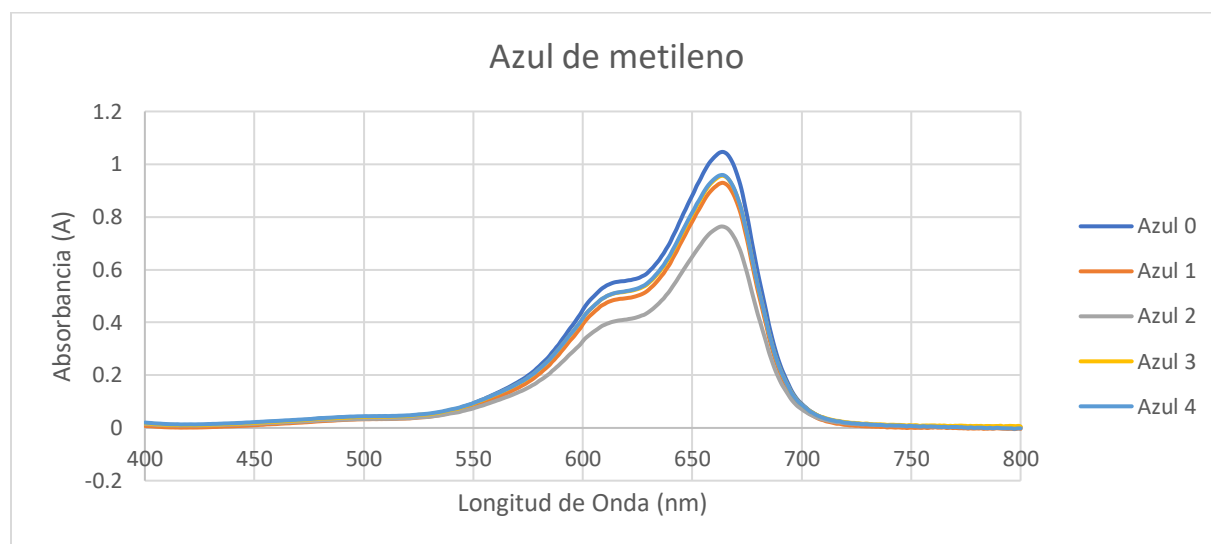


Figura 20 Análisis de UV vis del Azul de metileno. [Elaboración propia]

Nota: Azul 0 es la muestra en el tiempo 0 y Azul 4 en la muestra pasado 20 minutos.

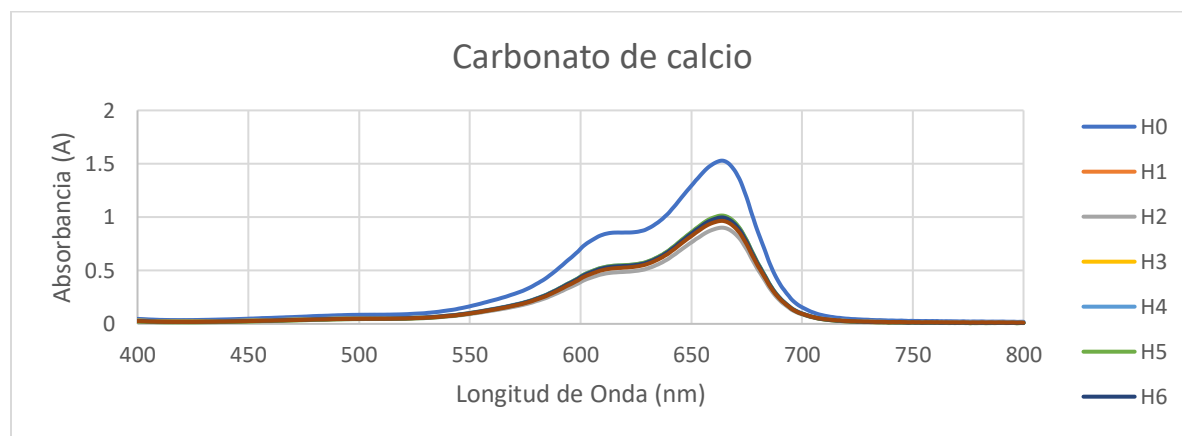


Figura 21 Análisis de UV vis del Carbonato de calcio. [Elaboración propia]

Nota: El término H0 corresponde al tiempo 0 y el término H6 corresponde al tiempo de 30 minutos.

Después analizar los espectros de las figuras 20 y 21 y la Tabla 9, se demostró que el azul de metileno no se degrada con el paso del tiempo bajo la exposición solar (fotólisis). Asimismo, al añadir carbonato de calcio en polvo (cascarón de huevo) al azul de metileno, tampoco se logra la degradación del azul de metileno. En el caso del CaCO_3 , en los primeros 5 min se observa una disminución en la intensidad del pico, esto se debe a un proceso de adsorción del en la superficie del CaCO_3 .

También se comprobó tanto de manera visual como mediante análisis de UV vis, que el “polvo obtenido” a partir de cascarón de huevo y “polvo obtenido” del cloruro de calcio comercial, que ambos lograron degradar el azul de metileno, como puede observarse en las Figuras 22 y 23. Donde se observan como la intensidad del pico de absorción disminuye respecto al tiempo, lo que confirma la efectividad de ambos métodos en la degradación del compuesto.

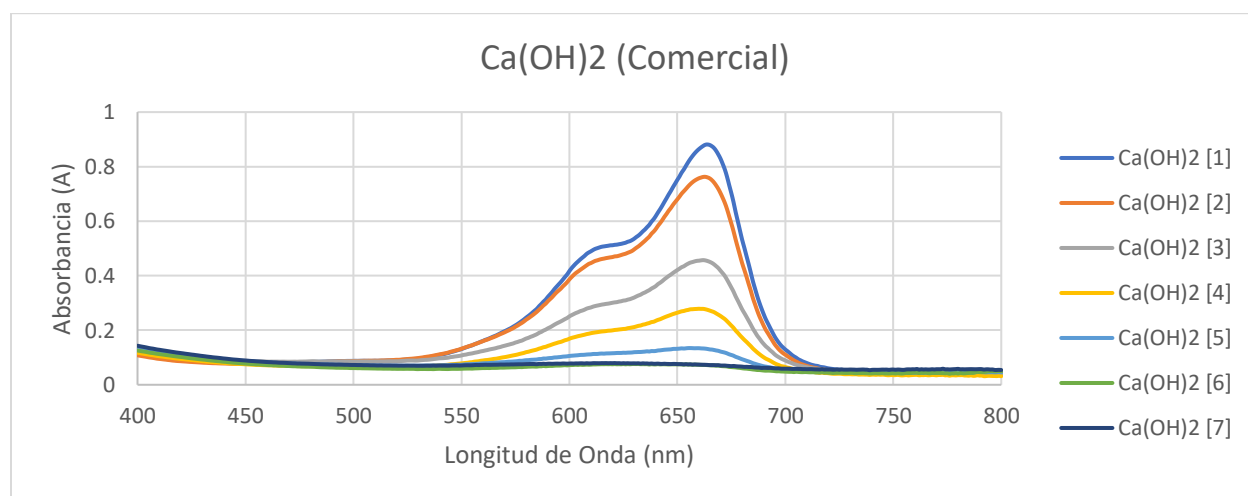


Figura 22 Análisis UV- vis del “polvo obtenido” a partir del cloruro de calcio comercial
[Elaboración propia]

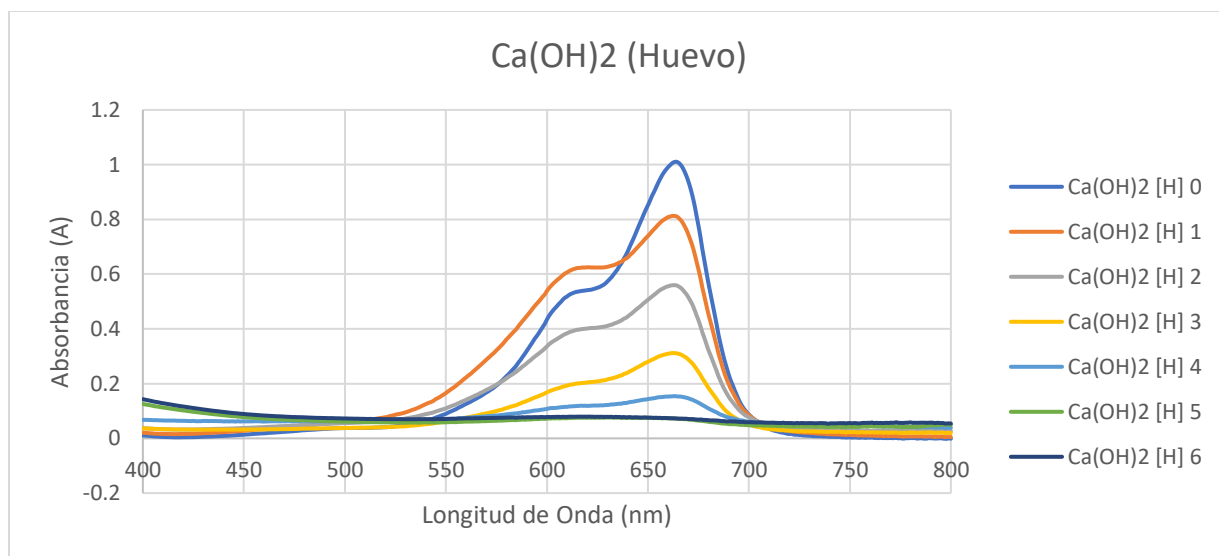


Figura 23 Análisis UV-Vis del “polvo obtenido” a partir del cascarón de huevo. [Elaboración propia]

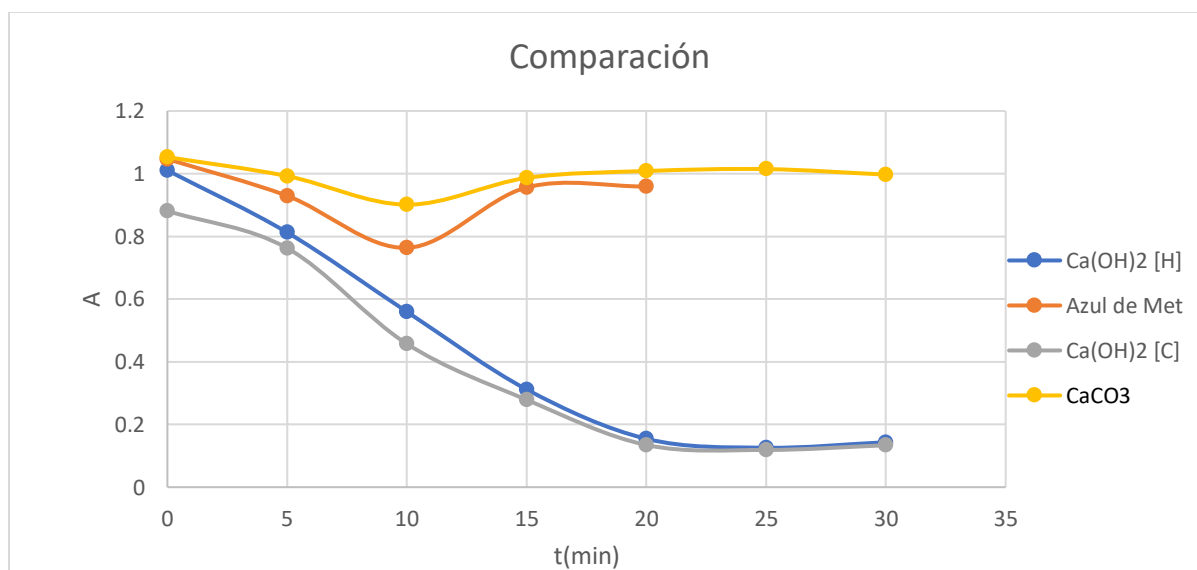


Figura 24 Comparación de la absorbancia de las muestras con respecto al tiempo. [Elaboración propia]

En la Figura 24 y Tabla 10 se observa la disminución de la absorbancia del azul de metileno a lo largo del tiempo, lo cual indica una reducción en su concentración conforme avanza el proceso fotocatalítico. Al comparar los resultados obtenidos para el hidróxido

de calcio comercial y el obtenido a partir del cascarón de huevo, se puede concluir que ambos presentan una actividad fotocatalítica muy similar. Esto demuestra que el producto sintetizado a partir del residuo presenta buena calidad y funcionalidad comparable a la del reactivo comercial.

Además, al calcular la eficiencia de degradación mediante la formula:

$$Eficiencia (\%) = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) * 100$$

Donde A_0 es la absorbancia inicial y A_t la absorbancia en el tiempo t, se observa que el hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo alcanza una eficiencia del 86.63% a los 30 minutos, mientras que el producto comercial logra una eficiencia de 84.83% en el mismo periodo.

Esto no solo confirma la capacidad del hidróxido de calcio proveniente del cascarón de huevo para degradar el azul de metileno, sino que también sugiere una ligera ventaja en cuanto a eficiencia cuando se utiliza el material sintetizado a partir de residuos, reafirmando su viabilidad como alternativa sustentable en procesos de remediación ambiental.

Tabla 10 Comparación de eficiencias en la degradación del azul de metileno.

Comercial		Huevo	
%Eficiencia (0-5)	13.4604472	%Eficiencia (0-5)	23.75
%Eficiencia (0-10)	48.1216661	%Eficiencia (0-10)	44.04
%Eficiencia (0-15)	68.3690841	%Eficiencia (0-15)	68.83
%Eficiencia (0-20)	84.7236409	%Eficiencia (0-20)	84.57
%Eficiencia (0-25)	86.5168539	%Eficiencia (0-25)	88.12
%Eficiencia (0-30)	84.8257859	%Eficiencia (0-30)	86.63

3.8 Comprobación del tratamiento en microondas

Después de lo planteado en la metodología para comprobar que el método asistido en microondas tiene mejor degradación que si no se usara, se degradaron las muestras para hacer su comparación en el UV-Vis. Por lo que se tomaron 2 muestras, la muestra donde se obtiene con el hidróxido de calcio a partir del cascarón de huevo con un tratamiento en microondas, y la muestra donde no se hace el tratamiento con

microondas; para ambas pruebas se obtuvieron los polvos, se tomaron 45 mg de cada uno y emplearon para degradar azul de metileno como en los experimentos anteriores. Los espectros UV-Vis se muestran en las Figuras 25 y 26, dando como resultado lo siguiente:

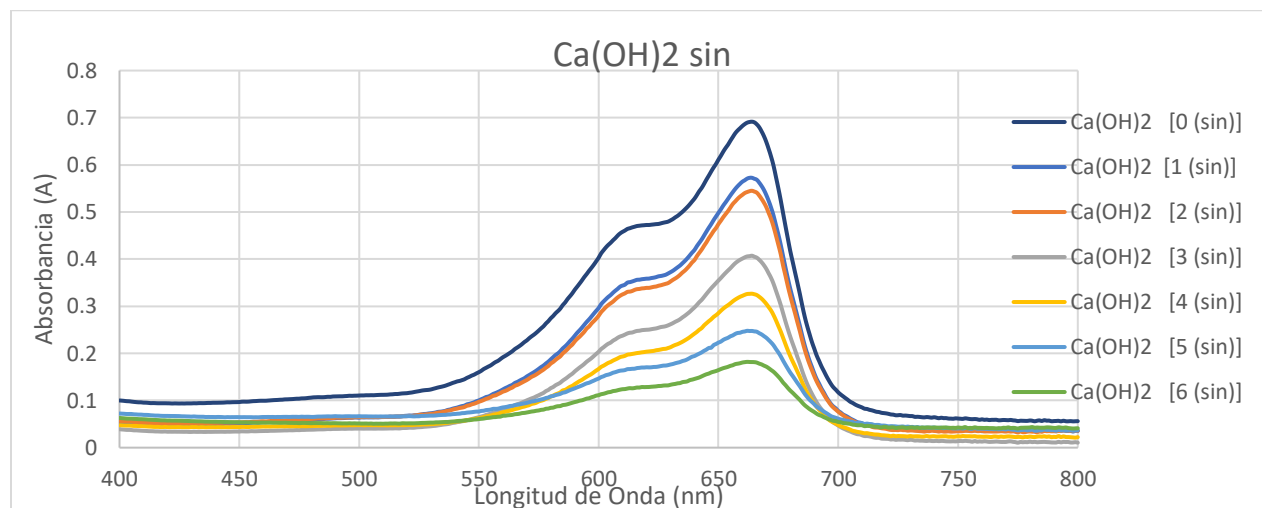


Figura 25 Análisis de UV vis del Hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo sin tratamiento en microondas. [Elaboración propia]

Nota: El término “Ca(OH)₂ sin” corresponde al hidróxido de calcio obtenido sin tratamiento en microondas

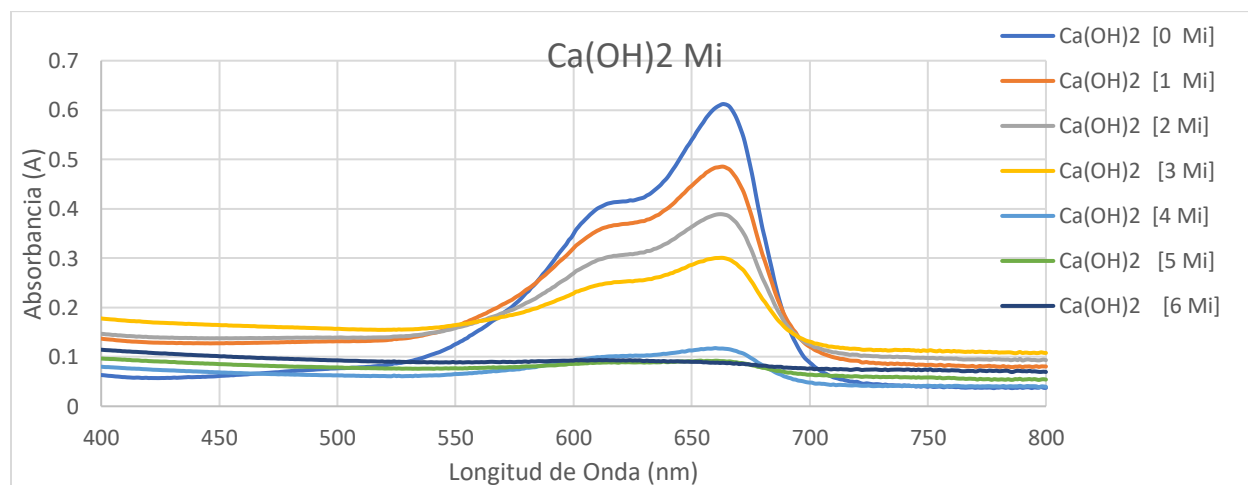


Figura 26 Análisis de UV vis del Hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo con tratamiento en microondas. [Elaboración propia]

Nota: El término “Ca(OH)₂ Mi” corresponde al hidróxido de calcio obtenido en microondas.

Como se observa en las figuras 25, 26, 27 y 28 se pudo comprobar que tanto los tratamientos de carbonato de calcio (cascarón de huevo) con la reacción de ácido clorhídrico (1M) e hidróxido de sodio con y sin tratamiento en microondas, en ambos se logró degradar el azul de metileno; sin embargo, el hidróxido de calcio obtenido con tratamiento en microondas logró degradar con mayor eficacia y en menor tiempo el azul de metileno, por lo que se pudo comprobar que el tratamiento en microondas da los mejores resultados en actividad fotocatalítica para la degradación de azul de metileno.

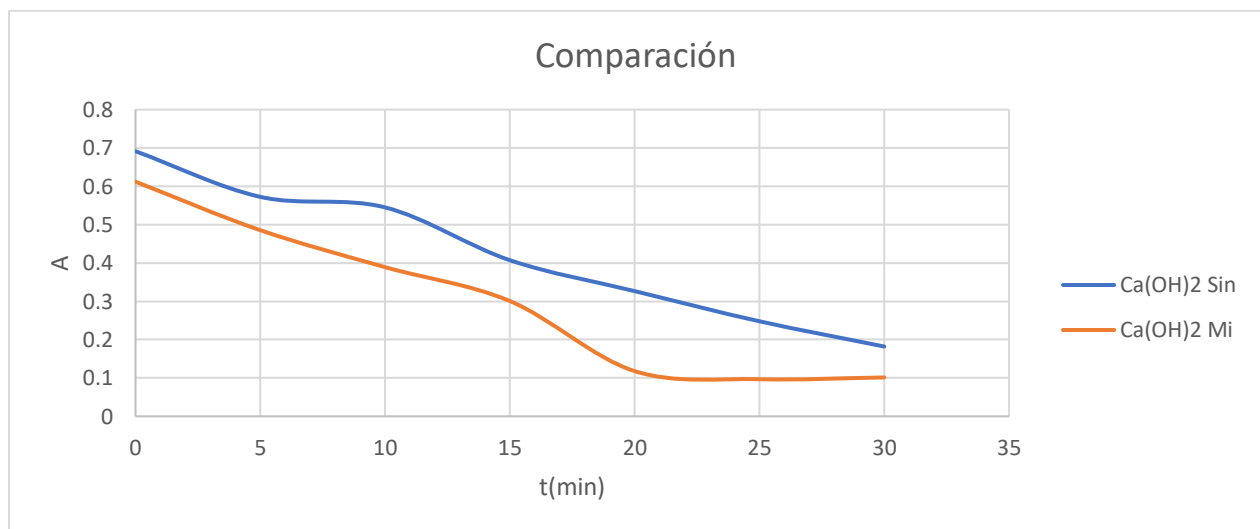


Figura 27 Comparación de los análisis de UV vis del Hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo con y sin tratamiento en microondas. [Elaboración propia]

Nota: La imagen fue elaborada mediante los datos obtenidos del UV vis y graficado en Excel; además fueron obtenidos 7 datos en un transcurso de 30 minutos para observar su comportamiento conforme al tiempo. El término “Ca(OH)₂ sin” corresponde al hidróxido de calcio obtenido sin tratamiento en microondas y el término “Ca(OH)₂ Mi” corresponde al hidróxido de calcio obtenido con microondas.

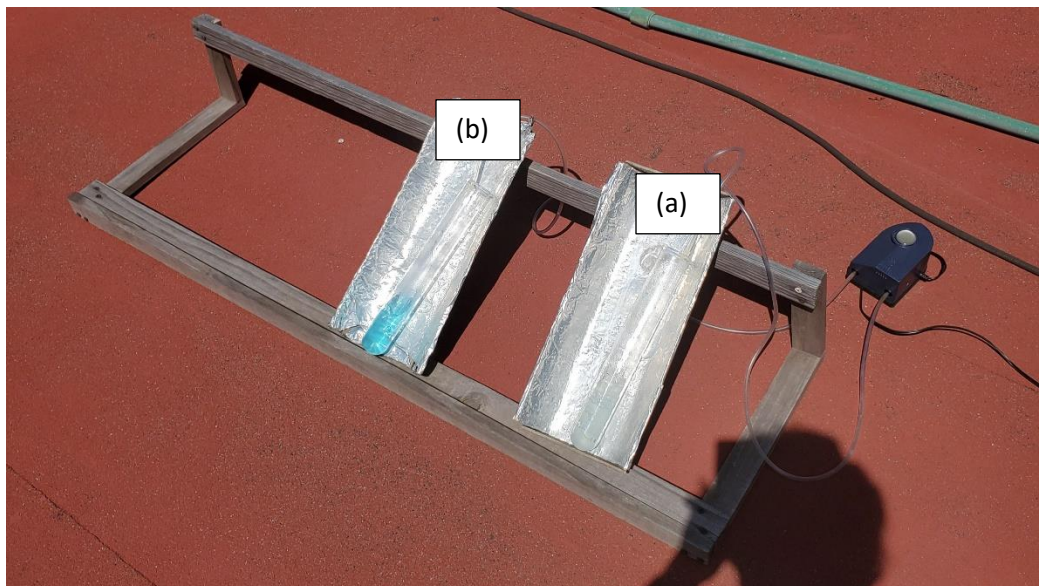


Figura 28 Comparación de la degradación del azul de metileno en el Hidróxido de calcio obtenido del cascarón de huevo con (a) y sin tratamiento en microondas (b). [Elaboración propia]

Nota: La figura 28 es una muestra de las diversas pruebas que se hicieron; donde el hidróxido de calcio sin tratamiento en microondas es el tubo izquierdo, y el hidróxido de calcio con tratamiento en microondas es el tubo del lado derecho; ambas pruebas se hicieron al mismo tiempo.

En la tabla 11 se presentan los resultados de la actividad fotocatalítica del hidróxido de calcio obtenido a partir del cascarón de huevo, comparando dos métodos de síntesis: con y sin tratamiento asistido por microondas. En ambos casos se utilizó una solución de azul de metileno a 100 ppm como contaminante modelo, evaluando su degradación a lo largo de 30 minutos mediante espectrofotometría UV-Vis.

A partir del análisis de los resultados, se puede observar que el tratamiento con microondas mejora significativamente la eficiencia del material en la degradación del colorante. A los 30 minutos, el hidróxido de calcio obtenido sin microondas alcanzó una eficiencia del 73.68%, mientras que el obtenido con microondas logró una eficiencia del 83.43%, es decir, casi 10% más. Este patrón se repite a lo largo de todo el experimento, siendo la muestra tratada con microondas consistentemente más eficiente en todos los intervalos de tiempo evaluados.

Tabla 11 Comparación de eficiencias con y sin síntesis asistida con microondas.

Sin		Microondas	
%Eficiencia (0-5)	17.208966	%Eficiencia (0-5)	20.6699346
%Eficiencia (0-10)	21.1858279	%Eficiencia (0-10)	36.4215686
%Eficiencia (0-15)	41.1135213	%Eficiencia (0-15)	50.8660131
%Eficiencia (0-20)	52.769342	%Eficiencia (0-20)	80.7352941
%Eficiencia (0-25)	64.1503977	%Eficiencia (0-25)	84.1830065
%Eficiencia (0-30)	73.6804049	%Eficiencia (0-30)	83.4313725

Conclusiones

Con el presente trabajo se demuestra que el cascarón de huevo, siendo un residuo orgánico de alto consumo en México, puede ser valorizado y aprovechado mediante procesos químicos y físicos, convirtiéndolo en un recurso útil para aplicaciones medioambientales. Al emplear compuestos como el ácido clorhídrico y el hidróxido de sodio, combinado con un tratamiento en microondas, se logró producir hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) de manera eficiente.

Este compuesto mostró un alto potencial para remediar la contaminación del agua, específicamente en la degradación de colorantes como el azul de metileno. Los resultados obtenidos demostraron que el hidróxido de calcio sintetizado a partir del cascarón de huevo y ácido clorhídrico presenta una eficacia comparable a la del Ca(OH)_2 obtenido a partir de cloruro de calcio comercial, con una diferencia del 1.8%, lo que valida la calidad del producto generado a partir del residuo.

Asimismo, el uso del tratamiento asistido con microondas se destacó como una técnica superior, no solo por mejorar la eficiencia energética y acortar los tiempos de síntesis, sino también por incrementar la eficacia fotocatalítica del hidróxido de calcio resultante. La comparación entre materiales obtenidos con y sin microondas demostró una mejora constante en el desempeño de los materiales tratados, reflejándose en mayores porcentajes de degradación del azul de metileno a lo largo del tiempo, llegando a una diferencia del 10% en la degradación a los 30 minutos.

Estos hallazgos evidencian la viabilidad de transformar un desecho abundante y económico en un compuesto sostenible con aplicaciones ambientales, subrayando la importancia de implementar estrategias innovadoras para la valorización de residuos y la conservación de los recursos naturales.

Bibliografía

- APARICIO CEJA, M., & CARBAJAL ARIZAGA, G. (Diciembre de 2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo nano*, 3(2), 62-72.
- Bedoya Salazar, A., & Valencia González, M. P. (11 de Septiembre de 2020). Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática. *Revista Colombiana de Ciencia Animal Recia*, 12(2), e776. doi:10.24188/recia.v12.n2.2020.776
- Beltrán Ramírez, N., González Fino, Y. M., & Hernández Gómez, L. J. (2 de Julio de 2021). *universidadean.edu*. Recuperado el 19 de Febrero de 2024, de Estudio para el desarrollo de un biomaterial de cáscara de huevo [Trabajo de grado, Universidad EAN]: <http://hdl.handle.net/10882/10786>
- Cabrera Penna, M., & Rodríguez Páez, J. (23 de Diciembre de 2020). Calcium oxyhydroxide ($\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$) nanoparticles: Synthesis, characterization and evaluation of their capacity to degrade glyphosate-based herbicides (GBH). *Advanced Powder Technology*, 32(1), 237-253. doi:10.1016/j.appt.2020.12.007
- Calcinor. (4 de Diciembre de 2020). *CALCINOR. Minerales industriales*. Recuperado el 22 de Febrero de 2024, de Óxido de calcio: <https://www.calcinor.com/es/productos/oxido-de-calcio-cal-viva>
- Caleras San Juan. (2016). *calerassanjuan*. Recuperado el 22 de Febrero de 2024, de Proceso de calcinación de la cal - Caleras San Juan: <https://www.calerassanjuan.com/calcinacion.html#:~:text=La%20reacci%C3%B3n%20de%20calcinaci%C3%B3n%20es,Calcio%20y%20Di%C3%B3xido%20de%20Carbono>
- Deutsche Química S.A. (22 de Diciembre de 2020). *Deutsche Química*. Recuperado el 15 de Febrero de 2024, de ¿Cómo prevenir la contaminación del huevo de microorganismos termorresistentes?: <https://www.deutschequimica.com/post/c%C3%B3mo-prevenir-la-contaminaci%C3%B3n-del-huevo-de-microorganismos-termorresistentes#:~:text=Las%20c%C3%A1scaras%20de%20huevo%20se,%2C%20el%20aire%2C%20el%20equipo>.
- Douglas A., S., F. James, H., & Stanley R., C. (2008). *Principios de análisis instrumental* (Sexta ed.). (M. Josefina Anzures, Trad.) Cengage Learning.
- Forbes Staff. (9 de Octubre de 2023). *Producción de huevo de México crecerá 2.8% en 2023, la de ave 2.1%*. Recuperado el 15 de Febrero de 2024, de Forbes México: <https://www.forbes.com.mx/produccion-de-huevo-de-mexico-crecera-2-8-la-de-ave-2-1-en-2023/>
- Francis, C. (2014). *QUIMICA ORGANICA* (Sexta ed.). McGraw-Hill.
- Gautron, J., Stapane, L., Roy, N., Nys, Y., Rodríguez Navarro, A., & Hincke, M. (11 de Enero de 2021). Avian eggshell biomineralization: an update on its structure, mineralogy and protein tool kit. *BMC Molecular and Cell Biology*, 22. doi:<https://doi.org/10.1186/s12860-021-00350-0>

- Granados, T. (2 de Septiembre de 2020). *HEREDIA gobierno local*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2023, de Pruebas en compostera industrial: <https://www.heredia.go.cr/es/bienestar-social/residuos-solidos>
- Gutiérrez, M. (10 de Octubre de 2023). *aviNews, la revista global de avicultura*. Recuperado el 16 de Enero de 2024, de México el principal consumidor de huevo a nivel global: ¡Celebra Día Mundial del Huevo 2023!: <https://avinews.com/mexico-el-principal-consumidor-de-huevo-a-nivel-global-celebra-dia-mundial-del-huevo-2023/>
- Hincapié Mejía, G., Ocampo, D., Restrepo, G., & Marín, J. (1 de Enero de 2011). Fotocatálisis Heterogénea y Foto-Fenton Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel. *Información tecnológica*, 22(2), 33-42. doi:10.4067/s0718-07642011000200005
- Iglesia segura. (14 de Junio de 2012). *Iglesia Segura*. Recuperado el 1 de Agosto de 2024, de Wordpress: <https://iglesiasegura.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/06/tabla-uv.jpg>
- Jayarao, B. M., Patterson, P. H., Wallner-Pendleton, E., Kariyawasam, S., & Denagamage, T. N. (1 de Junio de 2015). Risk Factors Associated With Salmonella in Laying Hen Farms: Systematic Review of Observational Studies. *Avian Diseases*, 59(2), 291-302. doi:10.1637/10997-120214-reg
- Jinmeng , Z., Peiyao , Z., Jinghan , D., Ying , D., Yijian , C., Wenqiang , D., . . . Mara , C. (1 de Julio de 2021). Nano Ca(OH)₂: A review on synthesis, properties and applications. *Journal of Cultural Heritage*, 50, 25-42. doi:10.1016/j.culher.2021.06.002
- Kaifeng, W., Peng, N., Zhang, D., Haijun, Z., Jinfeng, G., Huang, J., . . . Sun, J. (17 de Abril de 2023). Efficient removal of methylene blue using Ca(OH)₂ modified biochar derived from rice straw. *Environmental Technology & Innovation*(31), 103-145. doi:10.1016/j.eti.2023.103145
- Manjeet S., D., Tomer, V., & Duhan, S. (2018). Metal–ferrite nanocomposites for targeted drug delivery. En *Elsevier eBooks* (págs. 737-760). Elsevier. doi:10.1016/b978-0-12-813741-3.00032-7
- Mendoza Rodríguez, Y. Y., Brambila Paz, J., Arana Coronado, J. J., Sangerman Jarquín, D. M., & Molina Gómez, J. N. (2016). El mercado de huevo en México: tendencia hacia la diferenciación en su consumo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(6), 1455-1466. Recuperado el 20 de Diciembre de 2023
- Miriam , G. (13 de Octubre de 2021). *iAgua*. Recuperado el 17 de Febrero de 2024, de Fotocatálisis heterogénea para la eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales: <https://www.iagua.es/blogs/miriam-gutierrez-gonzalez/fotocatalisis-heterogenea-eliminacion-contaminantes-emergentes-aguas>
- Mital , K., & Kalpna , R. (2023). *Nanotechnology and In Silico Tools*. Elsevier. doi:10.1016/c2022-0-01382-9
- MITECO. (2019). *miteco.gob.es*. Recuperado el 22 de Febrero de 2024, de FABRICACIÓN DE CAL (EMISIONES DE PROCESO) : https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040614-descarbonatac-fabric-cal_tcm30-429852.pdf

- quimica.es. (s.f.). *quimica.es*. Recuperado el 22 de Febrero de 2024, de Óxido de calcio:
https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%93xido_de_calcio.html#:~:text=El%20%C3%B3xido%20de%20calcio%20reacciona,estos%20est%C3%A1n%20formados%20por%20agua).
- Ray, S., Barman, A., Roy, P., & Singh, B. (2017). Chicken eggshell powder as dietary calcium source in chocolate cakes. *The Pharma Innovation Journal*, 6(9), 1-4. Obtenido de
<http://www.thepharmajournal.com/archives/2017/vol6issue9/PartA/6-8-59-601.pdf>.
- Rodríguez Padrón, D., Luque, R., & Muñoz Batista, M. (28 de Noviembre de 2019). Waste-derived Materials: Opportunities in Photocatalysis. *Topics in Current Chemistry*, 378.
doi:10.1007/s41061-019-0264-1
- Semarnat,SGPA,DGGIMAR. (2005). *Semarnat*. Recuperado el 5 de Enero de 2024, de Generación de residuos sólidos municipales:
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen/08_residuos/cap8.html
- Tutiempo Network, S.L. (2024). *TuTiempo*. Obtenido de Índice Ultravioleta :
<https://www.tutiempo.net/indice-ultravioleta/puebla-pue.html>
- Vala, R., & Patel, H. (2023). Recent developments in the Hantzsch synthesis of dihydropyridines. En *Advances in heterocyclic chemistry* (págs. 179-208). Academic Press.
doi:10.1016/bs.aihch.2023.04.001
- Vázquez Martínez, D., Henkel García, J., Legorreta García, F., Barrientos Hernández, F., & Urbano Reyes, G. (2021). Extracción de calcio en solución a partir de cáscara de huevo. *ISSN National Centre for Mexico*, 8(8), 42-46.
- Zavala Segovia, M. d. (Abril de 2015). *Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM–UNAM*. Recuperado el 22 de Febrero de 2024, de Síntesis asistida por Microondas:
http://www.cciqs.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=85&Itemid=87#:~:text=La%20s%C3%ADntesis%20por%20microondas%20representa,sin%20contar%20que%20es%20una