

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO



Escuela Superior de Apan

LICENCIATURA EN INGENIERIA EN NANOTECNOLOGIA

TESIS DE LICENCIATURA

Estudio de ferritas de estroncio para la producción fotocatalítica de hidrógeno bajo luz visible

Para obtener el título de
Licenciado en Ingeniería en Nanotecnología

P R E S E N T A

Carlos Abdias Bautista Perez

No de cuenta: 357324

Directores:

Dra. Virginia Hidolina Collins Martínez

Dr. José de Jesús Pelayo Cárdenas

Apan, Hgo., 27 de julio de 2026





Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Escuela Superior de Apan
Campus Apan

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACION ESCOLAR
DE LA U.A.E.H.
PRESENTE

Por este conducto, le comunico que la Comisión Revisora asignada al trabajo de tesis del alumno de la Licenciatura en Ingeniería en Nanotecnología, **Carlos Abdías Bautista Perez**, con número de cuenta **357324**, quien presenta el tema **"Estudio de ferritas de estroncio para la producción fotocatalítica de hidrógeno bajo luz visible"**, después de revisar la tesis y constituida como Jurado, ha autorizado la impresión de la tesis, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se presentan las firmas de conformidad de los miembros de este jurado:

Cargo	Miembro del Jurado
PRESIDENTE	Dra. Virginia Hidolina Collins Martínez
SECRETARIO	Dr. José de Jesús Pelayo Cárdenas
PRIMER VOCAL	Dra. Blanca Cristina Hernández Majalca
SUPLENTE I	Dr. Alejandro López Ortiz

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
Apan, Hgo., a 09 de Julio de 2026

M.C. Esp. Enrique Espinosa Aquino
Director de la Escuela Superior de Apan





**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

PRESENTA:

Estudio de ferritas de estroncio para la producción fotocatalítica de hidrógeno bajo luz visible.

**TESIS
DE
LICENCIATURA**

**Para obtener el título de
Licenciado en Ingeniería en Nanotecnología**

**Presenta:
Carlos Abdías Bautista Pérez**

**ASESORES:
Dra. Virginia H. Collins Martínez
Dr. José de Jesús Pelayo Cárdenas**

**CO-ASESORIA:
Dra. Blanca Cristina Hernández Majalca**

CHIHUAHUA, CHIH.

Julio, 2026

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible este trabajo de tesis ya que la culminación de esta fue gracias a sus conocimientos y guía durante el desarrollo.

Agradezco a la Dra. Virginia Hidolina Collins Martínez por la oportunidad de trabajar con ella en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV-Chihuahua) y al Dr. José de Jesús Pelayo Cárdenas por su orientación, tiempo y paciencia durante la realización de este trabajo.

Asimismo, quiero agradecer a la Dra. Blanca Cristina Hernández Majalca y al Dr. Jorge Luis Domínguez Arvizu por su invaluable asesoramiento y acompañamiento durante mi estancia en el laboratorio de Fotocatálisis en el CIMAV y su apoyo en las caracterizaciones realizadas.

Por último, quiero agradecer a la Escuela Superior de Apan, al Centro de Investigación en Materiales Avanzados, a mis profesores y tutores por el tiempo y fomentar mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Quiero agradecer primero a mis padres, Edith Pérez Ortiz y Carlos Hernán Bautista Duran, ya que sin ellos no podría haberlo logrado, gracias a todo el apoyo, amor y consejos que me han brindado durante mi desarrollo, así como ser las primeras personas en confiar en mí y motivarme a seguir incluso cuando yo me quería rendir, este logro les pertenece tanto a ustedes como a mí por lo cual hoy puedo decirles lo logramos, gracias por todo.

Quiero agradecer igual a mi hermano Obed Isaías Bautista Pérez por su apoyo, cariño y ser mi compañero durante todos estos años, así como a mis abuelos Margarito Pérez Oropeza, Rosa Ortiz Serrano, Apolinar Bautista Cruz y Luz Mary Duran Cocuy por su apoyo, consejos y motivación que me brindaron durante toda esta etapa.

Agradezco a mis amigos Kevin, Brandon, Juan Pablo y Victor que estuvieron en los momentos que más apoyo necesite; así como agradezco a Aram, Anette, Diana, Ismael, Samara, Alan, Joel, Mariana, Leonardo, Brayan y Misael por ser mis amigos y compañeros de desveladas durante todo este trayecto, ayudarme a que todo este camino se sintiera más ligero, por sus consejos y motivación en todos los años que estuvimos juntos, en general agradezco a todos mis compañeros de generación.

Finalmente quiero agradecer al Dr. José de Jesús Pelayo Cárdenas y a la Dra. Virginia Hidolina Collins Martínez, por su paciencia, su guía, compartir sus conocimientos y confiar en mí, ya que sin ellos no hubiera sido posible llevar a cabo este trabajo; así como agradecer a todos los integrantes del laboratorio de Fotocatálisis del Centro de Investigación en Materiales Avanzados por compartir sus conocimientos y su compañerismo.

RESUMEN

La continua dependencia a los combustibles fósiles para la producción de energía sigue siendo una importante preocupación ambiental, incluso con los recientes avances en tecnologías renovables. Esta realidad ha impulsado la búsqueda de alternativas energéticas más limpias y sostenibles. El hidrógeno ha surgido como un portador de energía prometedor, capaz de satisfacer la demanda energética mundial mientras minimiza el impacto ambiental. Estudios recientes se han centrado en materiales con propiedades ópticas y fotocatalíticas adecuadas para la producción de hidrógeno impulsada por energía solar. Este estudio investiga la síntesis y el desempeño de la ferrita de estroncio en dos fases cristalinas: espinela (SrFe_2O_4) y perovskita (SrFeO_3), utilizando el método sol-gel. Estos materiales son atractivos debido a sus bajas energías de banda prohibida, aproximadamente 2.0 eV para el SrFe_2O_4 y 1.8 eV para el SrFeO_3 , y su síntesis sencilla. El objetivo principal es evaluar la eficiencia fotocatalítica de estos materiales en la generación de hidrógeno mediante el fotorreformado asistido de bioetanol. A diferencia de la división de la molécula del agua, este proceso integra la fotocatálisis con reacciones de reformado para producir hidrógeno a partir de materias orgánicas. El bioetanol, es un alcohol derivado de fuentes renovables como residuos agrícolas o cultivos energéticos, este actúa como donador de hidrógeno, ofreciendo una alternativa limpia y sostenible a los combustibles fósiles. La caracterización de los materiales incluyó Difracción de Rayos X (XRD) para confirmar la estructura cristalina, Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) para el análisis morfológico, Espectroscopía de Reflectancia Difusa para evaluar el comportamiento óptico y el análisis Brunauer–Emmett–Teller (BET) para determinar el área superficial y la porosidad. Los experimentos fotocatalíticos se realizaron en un reactor de cuarzo bajo irradiación de luz visible, simulando condiciones solares. La evolución del hidrógeno se monitoreó mediante cromatografía de gases. Se compararon las dos fases de ferrita para determinar cuál estructura presenta una mayor actividad fotocatalítica bajo condiciones impulsadas por energía solar. Los resultados buscan contribuir al desarrollo de fotocatalizadores eficientes y ecológicos para la

producción de hidrógeno, apoyando los objetivos globales de transición hacia energías limpias y descarbonización.

ABSTRACT

Currently, the continued dependence on fossil fuels for energy production remains a major environmental concern, even with recent advances in renewable technologies. This has driven the search for cleaner and more sustainable alternatives. As a result, hydrogen has emerged as a viable option to meet energy demands while minimizing environmental impact. Recent studies have focused on researching materials with suitable optical and photocatalytic properties for solar-driven hydrogen production. This study investigates the synthesis and performance of strontium ferrite in two crystalline phases: spinel (SrFe_2O_4) and perovskite (SrFeO_{3-x}), using the sol-gel method. These materials are attractive due to their low band gap energies, approximately 2.0 eV for SrFe_2O_4 and 1.8 eV for SrFeO_{3-x} , as well as their simple synthesis and environmental compatibility. The main objective is to generate hydrogen through the photoreforming of bioethanol. Unlike conventional water splitting, this process integrates photocatalysis with reforming reactions to produce hydrogen from organic matter. Bioethanol is an alcohol derived from renewable sources such as agricultural waste or energy crops and acts as a hydrogen donor, offering a clean and sustainable alternative to fossil fuels. The characterization of the materials was carried out using techniques such as X-ray Diffraction (XRD) to confirm the crystalline structure, Transmission Electron Microscopy (TEM) for morphological analysis, Diffuse Reflectance Spectroscopy to evaluate optical behavior, and Brunauer–Emmett–Teller (BET) analysis to determine surface area and porosity. The evaluation was conducted in a quartz reactor under visible light irradiation, simulating solar conditions. Hydrogen evolution was monitored using gas chromatography. The two ferrite phases were compared to determine which structure exhibits higher photocatalytic activity under solar-driven conditions. The results aim to contribute to the development of efficient and environmentally friendly photocatalysts for hydrogen production, supporting global goals for clean energy transition and decarbonization.

Índice

SECCION 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
SECCION 2: ESTADO DEL ARTE	3
2.1 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	3
2.2 FOTOREFORMADO DE BIOETANOL	5
2.3 FOTOCATÁLISIS.....	8
2.4 SEMICONDUCTORES	10
2.5 NANOPARTÍCULAS.....	12
2.6 FERRITA DE ESTRONCIO	14
SECCION 3: JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	16
JUSTIFICACIÓN.....	16
HIPÓTESIS.....	18
OBJETIVO GENERAL	18
Objetivos específicos	18
SECCION 4: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19
4.1 SÍNTESIS DE FERRITA DE ESTRONCIO	19
4.1.1 Síntesis de ferrita de estroncio en fase espinela por el método de sol-gel modificado con Pechini	19
4.1.2 Síntesis de ferrita de estroncio (SrFeO_3) por el método sol-gel	20
4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	21
4.2.1 Difracción de Rayos X	21
4.2.2 Microscopía Electrónica de Transmisión	22
4.2.3 Espectroscopía de Reflectancia Difusa	23
4.2.4 Área superficial (Análisis BET)	24

4.3	EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA	25
SECCION 5: DISCUSIÓN Y RESULTADOS		26
5.1	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	26
5.2	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN (TEM)	28
5.3	ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA DIFUSA	32
5.4	ANÁLISIS BET	34
5.5	EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA.....	35
SECCION 6: CONCLUSIONES		37
6.1	CONCLUSIONES	37
SECCION 7: REFERENCIAS.....		39

Tabla de Figuras

Figura 1.- Representación de reacción para la producción de H ₂ por medio de fotoreformado	6
Figura 2.- Esquema de mecanismos de reacción en la producción de H ₂ por etanol	7
Figura 3.- Representación del fenómeno fotocatalítico para la obtención de hidrógeno.....	9
Figura 4.- Representación gráfica de las bandas en materiales conductores, semiconductores y aislantes	10
Figura 5.- Transición de los semiconductores A) Band Gap Directo B) Banda Gap Indirecto	11
Figura 6.- Niveles de potencial redox de algunos semiconductores	12
Figura 7.- Diagrama de síntesis de ferrita de estroncio fase espinela.....	20
Figura 8.- Diagrama de sistesis de ferrita de estroncio fase perovskita.....	21
Figura 9.- Difractor de Rayos X marca PANalytical, modelo X'Pert PRO	22
Figura 10.- Equipo TEM JEOL JEM 2200FS+CS	23
Figura 11.- Equipo de espectrometría Perkin Elmer Lambda 35.....	24
Figura 12.- Equipo BET Marca 3P Instruments Modelo Micro 200	25
Figura 13.- Cromatógrafo Clarus 500 Perkin Elmer.....	26
Figura 14.- Patrones de difracción de rayos X de las muestras sintetizadas	27
Figura 15.- Micrografías modo STEM de múltiples regiones de la muestra SrFe ₂ O ₄ A) Región 1, B) Región 2, C) Región 3 y D) Región 4.....	29
Figura 16.- Micrografías modo STEM de la muestra SrFeO _{3-x} A) Región 1 y aumentos, B) Región 2.....	30
Figura 17.- Micrografía con mediciones de las muestras de SrFeO _{3-x}	31
Figura 18.- Mapeo elemental EDS de la muestra A) SrFeO _{3-x} y B) SrFe ₂ O ₄	32
Figura 19.- Grafica de Kubelka-Munk con las energías de las muestras.....	33

Figura 20.- Graficas Isotermas obtenidas del Análisis BET A) SrFe_2O_4 y B) SrFeO_{3-x} ... 34

Figura 21.- Graficas de producción de hidrógeno en 8 horas de las muestras..... 36

Seccion 1: Introducción

1.1 Introducción

En la última década, ha habido un aumento en la demanda energética, lo cual genera una preocupación creciente debido a la dependencia global de los combustibles fósiles. La quema de estos combustibles libera gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático y motivando la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles. En respuesta a esto, se están implementando políticas y programas para desarrollar nuevas fuentes de energía renovable. El hidrógeno se presenta como una de las alternativas prometedoras para un futuro energético descarbonizado, gracias a su alta densidad energética, cero emisiones y abundancia en la tierra. Este se clasifica en tres tipos principales según su producción y emisiones de carbono: gris, azul y verde. El hidrógeno verde es el más deseado por sus cero emisiones de carbono, siendo generado principalmente a través de la electrólisis alimentada por fuentes de energía renovables. Por lo cual, para producir grandes cantidades de hidrógeno verde, se requiere una mayor capacidad de generación eléctrica a partir de energías renovables [1,2].

Actualmente, la producción más eficiente de hidrógeno a nivel industrial se lleva a cabo mediante el reformado con vapor de metano; sin embargo, este proceso no es sostenible, ya que implica la emisión significativa de dióxido de carbono. Existen otras rutas para la obtención de hidrógeno, como la gasificación de carbón o biomasa, la descomposición térmica, la electrólisis y la fotólisis del agua, pero todas ellas requieren insumos energéticos considerables o dependen de fuentes no renovables. En este escenario, los métodos fotocatalíticos emergen como una alternativa prometedora y renovable para la producción sostenible de hidrógeno, al aprovechar la energía solar para superar las limitaciones de los procesos convencionales, que suelen ser intensivos en energía y poco selectivos [1-4].

Entre estas estrategias, el fotoreformado de compuestos derivados de biomasa, como el bioetanol, es un proceso prometedor para la producción de hidrógeno verde. El bioetanol, se puede obtener de biomasa del maíz, caña de azúcar o residuos agrícolas, ofreciendo una vía atractiva para la producción de hidrógeno aprovechando la energía solar [4,5]. La eficiencia del fotoreformado puede mejorarse combinando las características de la catálisis convencional con el aprovechamiento de la energía solar este proceso se denomina fotocatalisis [2,4,5]. Este implica la fotogeneración de un par electrón-hueco cuando un electrón de la banda de valencia es excitado a la banda de conducción del material. Para que la fotocatalisis sea efectiva bajo luz visible, la energía de banda prohibida (E_g) del semiconductor debe estar entre 1.23 eV y 3.0 eV. Para una producción eficiente, se requiere una interacción efectiva entre la luz, el fotocatalizador y los reactivos. Dado que la luz solar se compone aproximadamente de un 46% de luz visible, un fotocatalizador eficiente debe tener un intervalo de banda en el rango de 400 nm a 1100 nm [2,5,6,8].

Los semiconductores son clave en el proceso de fotoreformado, ya que su banda de valencia permite la oxidación de compuestos orgánicos, lo que mejora la generación de hidrógeno y reduce la recombinación de portadores de carga. Además, el fotoreformado no produce O_2 , lo que suprime la reacción inversa de formación de agua y aumenta el rendimiento de H_2 . Los alcoholes, ácidos y aldehídos, son algunos ejemplos de sustancias orgánicas utilizadas comúnmente en la producción de hidrógeno en procesos fotocatalíticos [1,4,5].

Los semiconductores se pueden sintetizar de diversas formas como lo son por molienda, deposición química de vapor y síntesis electroquímica, estos métodos son conocidos como *top-down* o de arriba hacia abajo. Por otro lado, los métodos *bottom-up* o de abajo hacia arriba, como la coprecipitación, solvothermal y sol-gel, permiten tener un control preciso del tamaño y la morfología de las partículas. El método sol-gel es el principal en la síntesis de semiconductores, dado que ofrece homogeneidad en la mezcla de componentes [16-18].

Dentro de la gran variedad de semiconductores que pueden ser utilizados para esta aplicación (fotoreformado de etanol) este estudio se encuentra enfocado a las ferritas con dos fases diferentes, en de este documento se encontrará el estudio del estado del arte, con respecto a la producción de hidrógeno, posteriormente se profundizará en las propiedades de los semiconductores, por qué la ferritas son de interés para esta investigación, la hipótesis y objetivos, así como la metodología seguida para la realización de este estudio. En la sección de discusión y resultados, se hace la disertación de los resultados obtenidos de las caracterizaciones propuestas en la metodología, así como la evaluación fotocatalítica de los materiales para la evolución de hidrógeno, por último, las conclusiones del trabajo realizado y trabajo a futuro.

Seccion 2: Estado del Arte

2.1 Producción de hidrógeno

Durante la última década, se ha observado un crecimiento en la demanda energética. La preocupación por este incremento es cada vez mayor, ya que la economía energética mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles, cuyo proceso de transformación en energía supone la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo cual es un importante desafío global ya que el notable cambio climático en el planeta es una de las principales razones por las que se buscan nuevas soluciones para cubrir la demanda energética actual sin perjudicar al medio ambiente. Se han comenzado a implementar políticas, programas de reestructuración y esfuerzos globales para desarrollar nuevas opciones de combustibles que aprovechen mejor el potencial de las fuentes renovables en la producción de energía sostenible [1,2].

El hidrógeno se considera como un candidato perfecto para un futuro energético descarbonizado, debido a su mayor densidad energética, cero emisiones, y su abundancia en la tierra [1,2]. Una clasificación popular, que se relaciona con las materias primas utilizadas y las emisiones de carbono durante el proceso de

producción, son de tres tipos principales de colores para el hidrógeno, los cuales son: gris, azul y verde. El color más atractivo y deseado para el hidrógeno, como combustible limpio y sostenible, es el verde, que es el más limpio debido a las cero emisiones de carbono. El hidrógeno verde se genera principalmente a través de la electrólisis generada por electricidad de fuentes de energía renovables; por lo cual la producción de grandes cantidades de hidrógeno verde requiere mayores capacidades de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables [1].

La producción de hidrógeno eficiente se realiza en la actualidad principalmente a través del reformado con vapor de metano a partir de gas natural, pero la generación de dióxido de carbono como producto descalifica este método como sostenible [1,2].

Además, el hidrógeno de gas natural puede ser producto de la transformación de recursos que contienen hidrógeno, como el carbón, componentes y derivados de biomasa, agua, mediante gasificación, descomposición térmica, electrólisis o fotólisis. Lamentablemente, la mayoría de estos métodos requieren energía externa, como calor o electricidad, o incluso el uso de fuentes de H_2 no renovables [1,3].

La producción de hidrógeno mediante métodos fotocatalíticos surge como una alternativa renovable a las técnicas utilizadas que dependen de combustibles fósiles, así como una solución para alcanzar pronto la energía sostenible [1,2].

Actualmente, los procesos que utilizan agua como materia prima para la producción de hidrógeno son los que consumen mayor energía, por lo que permiten generar cantidades equivalentes a su producción mundial. Sin embargo, estos procesos convencionales sufren varias desventajas, que incluyen, baja selectividad, son termodinámicamente menos favorables y un tratamiento costoso de las materias primas [1,3]. Por lo tanto, el fotoreformado de oxigenados biorenovables ha surgido como un proceso prometedor para la producción de hidrógeno verde y sostenible debido a su capacidad para superar estos problemas mencionados anteriormente. La tasa de producción de hidrógeno a través del fotoreformado de oxigenados biorenovables depende del material fotocatalítico, las condiciones de operación, el reactivo y la estructura del agente de sacrificio [3].

2.2 Fotoreformado de bioetanol

El fotoreformado se presenta como un proceso accesible para la conversión de materiales provenientes de biomasa, como lo son carbohidratos, residuos agrícolas, glicopolímeros y desechos alimentarios. Esto en base a su composición química, contenido energético y aspectos de sostenibilidad de dichos materiales; considerando factores apropiados para este proceso como su abundancia, disponibilidad y potencial para la producción de hidrógeno [1,4].

En el caso del hidrógeno generado por este medio, los intereses ambientales y económicos se ven afectados por la eficiencia y el coste de la generación, debido a la baja eficiencia de conversión de energía de los fotones en hidrógeno. Una posible solución que se ha planteado es aumentar la eficiencia del fotocatalizador con soluciones altamente eficientes para el aprovechamiento de la energía solar [1,3,4].

El uso de semiconductores en el proceso de fotoreformado, se debe a que estos poseen una banda de valencia con un potencial capaz de realizar la oxidación del compuesto orgánico presente [1].

El uso de compuestos orgánicos, mejora considerablemente la generación de hidrógeno como se puede observar en la Figura 1, puesto que requiere de menor energía (menos fotones en el proceso) para llevar a cabo las reacciones involucradas y además estos “secuestran” los huecos fotogenerados oxidando el compuesto orgánico, así disminuyendo la recombinación de los portadores de carga (e^-/h^+). Es importante mencionar que la generación de O_2 no ocurre en el proceso de fotoreformado, lo cual suprime la reacción inversa para generar H_2O , aumentando el rendimiento en la producción de H_2 [1,4,5].

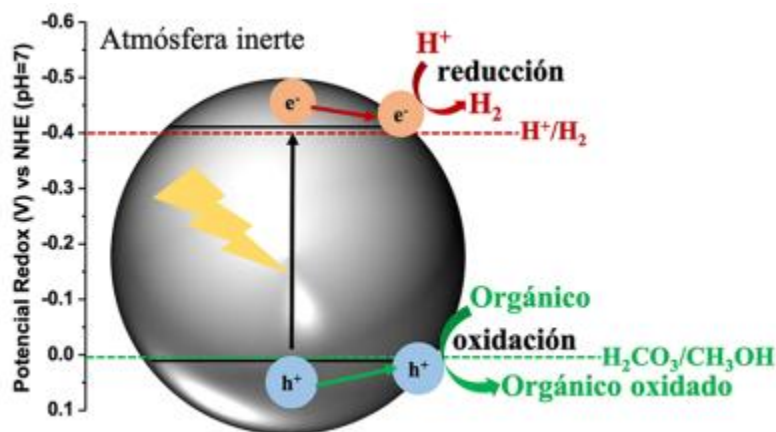


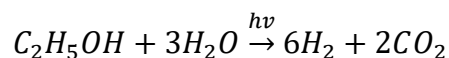
Figura 1.- Representación de reacción para la producción de H_2 por medio de fotoreformado

Fuente: Ortega et al. (2024) Producción fotocatalítica de hidrógeno empleando semiconductores modificados con nanopartículas metálicas. Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología

Algunas de las sustancias orgánicas utilizados en el fotoreformado son los alcoholes (metanol, etanol, butanol, 2-propanol), ácidos (ácido fórmico, ácido acético) y aldehídos (formaldehído, acetaldehído), los cuales son usados en procesos fotocatalíticos para mejorar la producción de hidrógeno. Los alcoholes son los más comunes cuando se usan óxidos semiconductores, como el dióxido de titanio (TiO_2)[1,4,5].

El bioetanol es producto derivado de la biomasa que puede utilizarse en el proceso de producción de hidrógeno limpio. Este se obtiene por fermentación a partir de biomasa, como maíz, caña de azúcar, remolacha; o lo que es importante desde el punto de vista de la demanda energética mundial, a partir de biomasa no comestible, procedentes de residuos leñosos y agrícolas, así teniendo un menor impacto en la cadena alimentaria. Esta variedad de materias renovables para la producción de bioetanol abre una vía atractiva para la producción de hidrógeno a partir de bioetanol. Aprovechando energía solar, mediante el diseño de un fotocatalizador diseñado para la conversión de etanol en hidrógeno [1,4].

En el proceso de fotoreformado completo de etanol se observa la siguiente reacción en la conversión en hidrógeno y dióxido de carbono



El etanol en comparación con otros compuestos derivados de biomasa usados, como lo son alcoholes superiores, ácidos y aldehídos, presenta una conversión en CO_2 de las más viable debido a la estructura simple de la molécula [1].

Un menor número de carbonos en la estructura resulta en menos reacciones intermedias y una formación limitada de subproductos. La reacción de fotoreformado del etanol puede dividirse en dos reacciones predominantes como la deshidrogenación del etanol y el fotoreformado de acetaldehído. Otras posibles reacciones involucradas en el proceso de fotoreformado de etanol son la descomposición de acetaldehído y el Gas-Water Shift. El acetaldehído puede continuar el proceso de fotoreformado a dióxido de carbono o descomponerse para formar metano y monóxido de carbono. El CO y el CO_2 pueden convertirse entre sí a través de una reacción de Water-Gas Shift [1]. Estas reacciones las podemos observar en la Figura 2.

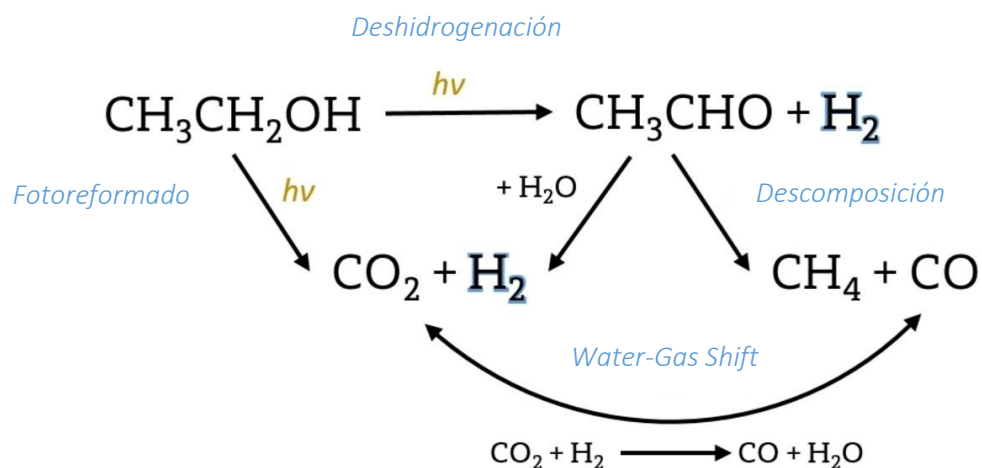


Figura 2.- Esquema de mecanismos de reacción en la producción de H_2 por etanol
Fuente: Cwieka et al. (2021) Supported Plasmonic Nanocatalysts for Hydrogen Production by Wet and Dry Photoreforming of Biomass and Biogas Derived Compounds: Recent Progress and Future

2.3 Fotocatálisis

La fotocatálisis es un proceso que ocurre gracias a la intervención de la energía solar cuando interacciona a nivel fisicoquímico con materiales semiconductores [2,5-9]. Este proceso ha tomado relevancia por la creciente búsqueda de vectores energéticos siendo uno de estos el hidrógeno; en la producción fotocatalítica de combustibles ofrece una ventaja sobre la conversión de energía solar en eléctrica ya que la producción fotocatalítica proporciona un método alternativo para almacenar la energía del sol en enlaces químicos pudiendo estos liberarse posteriormente sin producir subproductos dañinos [5-7].

La fotocatálisis se lleva a cabo gracias a la fotogeneración de un par electrón-hueco en un material semiconductor, por la excitación del electrón que se encuentra en las bandas de valencia (BV), logrando así que se promueva a la banda de conducción (BC) del material; este proceso ocurrirá siempre y cuando la energía del electrón excitado sea suficiente para saltar la banda prohibida de energía (E_g) [2,5-11]. Por lo tanto, la banda prohibida que es la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción, para poder utilizar luz visible en un semiconductor fotocatalítico el intervalo de energía de banda prohibida de ser entre 1.23 eV y 3.0 eV ya que en este rango es el mínimo para realizar water splitting y el valor máximo para poder efectuarse con luz visible, para que el fenómeno de fotocatálisis se vea favorecido y pueda ayudar a la generación de energías limpias, como la producción de hidrógeno y la eliminación de contaminantes [6,8-11]. La Figura 3 nos muestra el proceso que realiza un material con propiedades fotocatalíticas como se había mencionado previamente.

La búsqueda de la generación de energías limpias y la eliminación de contaminantes han sido las principales problemáticas en los últimos años, por lo que la búsqueda de un material semiconductor con un intervalo de banda adecuado para actuar como fotocatalizador ha sido el objetivo de considerables investigaciones [6,10].

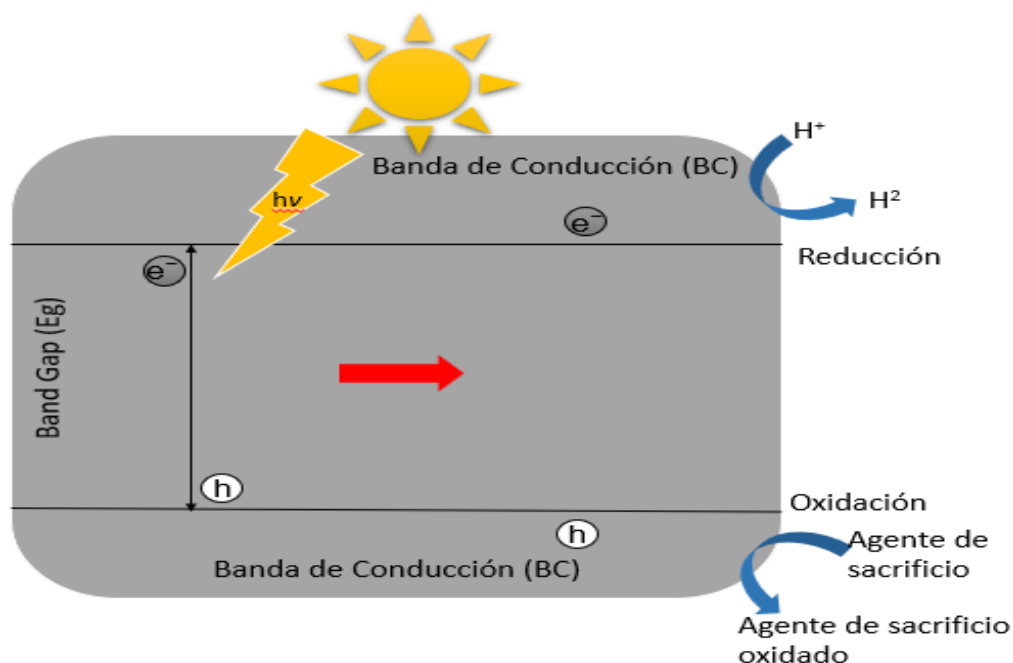


Figura 3.- Representación del fenómeno fotocatalítico para la obtención de hidrógeno

Para obtener una producción de hidrógeno eficiente es necesario que el material presente un valor de band gap ideal para lograr una interacción entre la luz, el fotocatalizador y los reactivos [7,9]. Otras propiedades que debe presentar un fotocatalizador es alta absorción de la luz solar, por lo tanto, para que sea activo bajo la irradiación de la luz solar, su intervalo de banda debe estar en el rango de 400 nm a 1100 nm de longitud de onda (longitudes de onda con mayor presencia en el espectro solar) [2,5-8,10]. Una de las propiedades más importantes es la gran área superficial debido a que una mayor área superficial proporciona más sitios activos para las reacciones [8,9,10]. Por último, una tasa baja de recombinación de electrón/hueco para que exista una interacción entre el fotocatalizador y los reactivos [7,9,10].

Las ferritas han presentado una banda prohibida adecuada, una alta eficiencia en la absorción de luz, como un buen tamaño de área superficial propiedades importantes para la fotocatálisis, lo cual las convierte en materiales apropiados para su estudio como fotocatalizadores [2,6,9, 10].

En general, la fotocatálisis se puede describir en tres pasos principales: absorción de luz de la fuente luminosa, la generación de portadores de carga (huecos positivos

en la banda de valencia y electrones en la banda de conducción), migración de carga hacia la superficie del semiconductor, transferencia y separación e inicio de la reacción redox en la superficie del fotocatalizador [6-8].

2.4 Semiconductores

Los materiales pueden clasificarse, de acuerdo a su resistividad eléctrica, en conductores, semiconductores y aislantes, cuyo comportamiento se distingue por sus estructuras de bandas; los semiconductores constituyen una amplia clase de materiales cuya conductividad eléctrica aumenta con la temperatura y es significativamente menor que la de los materiales conductores; estas características se pueden explicar gracias a su estructura de bandas la cual nos ayuda a comprender los fenómenos de conductividad eléctrica que ocurren en los materiales [12-15]. La estructura de bandas nos dice la existencia de la banda de valencia (portadora de huecos) y la banda de conducción (portadora de electrones) siendo esta última en donde se presentan los últimos estados de energía de los materiales [12,13]. Como se puede observar en la Figura 4;

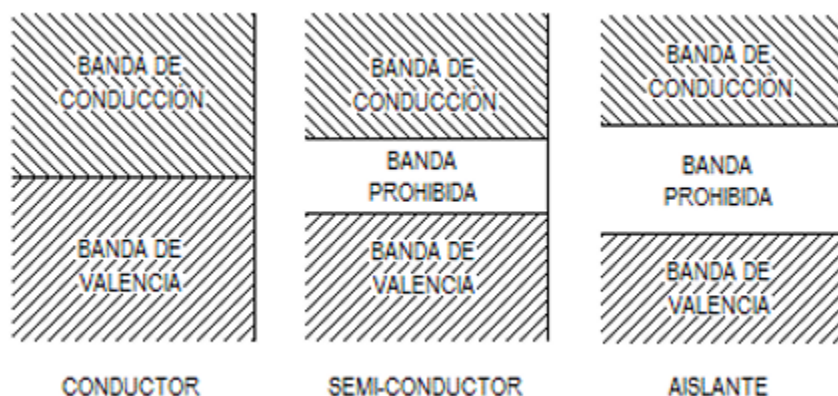


Figura 4.- Representación gráfica de las bandas en materiales conductores, semiconductores y aislantes
Fuente: Farrera, L. (2008). Conductores semiconductores y aislantes.

los materiales conductores presentan una estructura de bandas unidas o incluso transpuestas [12], mientras que para los materiales semiconductores y aislantes aparece la banda de energía prohibida (band gap por su nombre en inglés o E_g por

sus siglas) y dependiendo del ancho entra en la clasificación de alguno de estos [12-15]. La posición de la energía de Fermi (por sus siglas E_F) dentro de los semiconductores cae en la banda de energía prohibida [13,15].

En los semiconductores a diferencia de los aislantes, la banda de energía prohibida es suficientemente pequeña como para que sea posible excitar electrones de la banda de valencia a la de conducción ya sea térmicamente, con luz o con descargas eléctricas, los aislantes tienen una banda prohibida superior a 4 eV, por lo cual para los semiconductores $0 \text{ eV} < E_g < 4 \text{ eV}$ [12-14].

Dentro de estos materiales se ha observado que puede ocurrir que el máximo de la banda de valencia se encuentra en $k_v = 0$, mientras que el mínimo de la banda de conducción ocurre en un vector de onda diferente, ósea $k_c \neq 0$; los semiconductores con esta característica se denominan semiconductores de band gap indirecto. Por otro lado, cuando el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción están en el mismo vector de onda, $k_c = k_v$ el material se denomina semiconductor de band gap directo [14,15]. Como se puede ver en la Figura 5

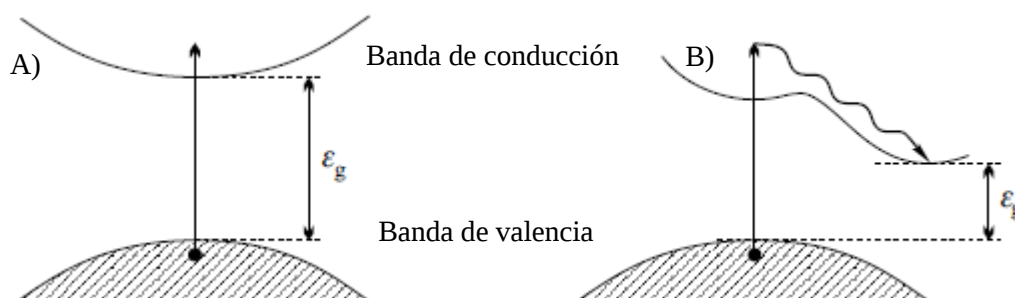


Figura 5.- Transición de los semiconductores A) Band Gap Directo B) Banda Gap Indirecto
Fuente: Sólyom, J. (2009). *Electronic structure of semiconductors [Libro Digital]. En Fundamentals of the Physics of solids (Vol. 2). Springer.*

Los semiconductores tienen el potencial para oxidar o reducir de acuerdo con sus BC y BV, esto se puede obtener con respecto al potencial del electrodo normal de hidrógeno (ENH). En la Figura 6 se observan semiconductores que han sido utilizados en el proceso de fotocátalisis donde se observan las bandas de conducción y de valencia con respecto del ENH. Los materiales cuya BC se encuentra encima de la línea de H^+/H_2 son capaces de reducir, mientras que los

materiales cuya BV se encuentra ubicada debajo de la línea O_2/H_2O pueden realizar una oxidación [2.6].

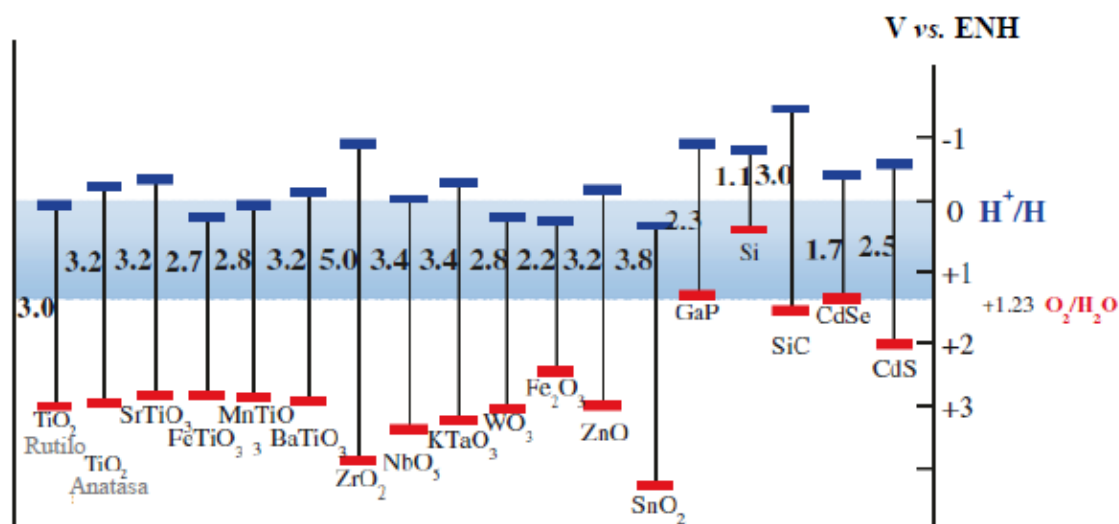


Figura 6.- Niveles de potencial redox de algunos semiconductores
Fuente: Jiménez-Miramontes, et. al. (2017) Synthesis, characterization and photocatalytic evaluation of strontium ferrites towards H₂ production by water splitting under visible light irradiation.

Las ferritas son un claro ejemplo de materiales semiconductores, ya que se ha reportado que estas pueden tener valores de la banda de energía prohibida relativamente bajos (aproximadamente $1.0 \text{ eV} < E_g < 2.0 \text{ eV}$) lo cual favorece a este material para actividades electrónicas, catalíticas y fotocatalítica [6].

2.5 Nanopartículas

Gracias a la nanotecnología aumenta continuamente la disponibilidad y producción de nanomateriales, con aplicaciones en áreas cada vez más diversas. Los nanomateriales se pueden definir como aquellos en los que alguna de sus dimensiones se encuentra entre 1 y 100 nm, presentando distintas formas y composiciones, en correspondencia con su aplicación; estas se pueden clasificar de acuerdo con sus dimensiones (0-D, 1-D y 2-D) siendo la 0-D la categoría en la cual se ubican las nanopartículas, estos se caracterizan porque todas sus dimensiones se encuentran en el rango de 1 a 100 nm [16,17,19]. Algunas

nanopartículas son los óxidos de hierro y estas han sido utilizadas en varias aplicaciones como catálisis, dispositivos electrónicos, almacenamiento de información, sensores, biomedicina, dispositivos de almacenamiento magnético y remediación ambiental [16,19]. En la nanoescala la materia exhibe algunas propiedades que pueden ser diferentes de las propiedades del material macroscópico al material en forma de átomos y moléculas; como las magnéticas, ópticas y electrónicas; como lo pueden ser cambios en su comportamiento magnético, cambios de color, mayor reactividad, etc. [17-19]. La aparición de estos cambios en sus propiedades se relaciona con la gran energía superficial y el mayor número de átomos superficiales en las nanopartículas (relación superficie/volumen de las nanopartículas) [18,19]. Las nanopartículas pueden obtenerse principalmente por dos métodos el método top-down (de arriba hacia abajo) en los cuales se encuentran mayoritariamente las técnicas físicas, que consiste en la subdivisión mecánica del material; y el método bottom-up (de abajo hacia arriba) en el cual se encuentran las técnicas químicas, que consisten en la nucleación y el crecimiento de las partículas a partir de los átomos [17,18].

Entre algunos de estos métodos top-down se pueden encontrar los siguientes: Molienda, que es un método consistente en moler partículas de tamaño macro o micrométrico, por medio de molinos de alta eficiencia. Las partículas resultantes son procesadas por medios físicos, recuperándose las de tamaño nanométrico [17]. Deposición química de vapor consiste en la evaporación de precursores y la posterior reacción o descomposición para dar lugar a los coloides sobre un sustrato [18]. Síntesis electroquímica que es un método consistente en utilizar como fuente de los átomos metálicos un ánodo de sacrificio, el cual es oxidado en presencia de una sal de amonio cuaternario, compuesto que de igual forma ejerce como electrolito y estabilizante: los cationes metálicos se dirigen hacia el cátodo donde son reducidos produciendo los átomos que formarán las nanopartículas [18].

Algunas de las técnicas que podemos encontrar en métodos bottom-up son los siguientes: Coprecipitación, el método consiste en la precipitación simultánea de

dos o más compuestos a partir de una solución, lo que permite un control preciso del tamaño y la morfología de las partículas mediante la modificación de condiciones de reacción como el pH, la temperatura y las concentraciones de los reactivos [16,18]. Solvothermal: esta técnica consiste en disolver un precursor metálico en un líquido, este es depositado en un recipiente cerrado y es calentado por encima de su punto de ebullición, lo que genera una presión superior a la atmosférica. El líquido habitualmente es agua, ahí se conoce como “síntesis hidrotermal”; sin embargo, se utilizan otros medios líquidos como: disolventes orgánicos, amoníaco líquido, hidracina, entre otros; haciendo la síntesis solvothermal [17,18], y el método sol-gel el cual consiste en iniciar de una solución química o sol que actúa como precursor de una red integrada ya sea de partículas discretas o de una red de polímeros. La cual sufre varias reacciones de hidrólisis y policondensación para formar una dispersión coloidal, que luego de una polimerización lenta forma un gel. Donde se ven involucrados procesos químicos y físicos asociados con la hidrólisis, polimerización, gelificación, condensación, secado y densificación [17].

2.6 Ferrita de estroncio

Las ferritas son materiales que presentan propiedades importantes para la industria, además, son materiales amigables con el ambiente [6]. Las propiedades de las ferritas, como las magnéticas, electrónicas y catalíticas, así como su capacidad de oxidación y descomposición de gases, varían dependiendo de la naturaleza estructural de la ferrita y del metal incorporado en ella [6,10,20]. Por lo cual han sido motivo de estudio para la producción de hidrógeno por medio de fotocatalisis, la Tabla 1 muestra algunos valores reportados en ferritas para la producción de hidrógeno

Tabla 1.- Ferritas utilizadas en producción de hidrógeno

Fase	Producción de Hidrógeno (mmol h ⁻¹)	Referencia

Fe_3O_4	1.56	8
ZnFe_2O_4	5.46	8
CdFe_2O_4	5.87	8
NiFe_2O_4	6.19	8
$\text{Sr}_7\text{Fe}_{10}\text{O}_{22}$	0.0686	2,6

Las ferritas en fase espinela, que tienen una fórmula general de MFe_2O_4 (donde M es un metal incorporado), poseen dos formas: ortorrómbica y tetragonal; estas varían de acuerdo con el material y el método de síntesis utilizado [2,8,9,20-23]. Entre algunas de las principales ventajas de la estructura tipo espinela son que las propiedades de las ferritas, como la catálisis y la estabilidad, así como el costo razonable de fabricación se ven beneficiadas [6,11,24-26]; las ferritas en fase espinela poseen la capacidad de absorber más luz visible debido a sus propiedades estructurales estables y únicas [6,8,9,24]. Por lo tanto, se convierten en materiales de gran interés para su investigación y aplicaciones [6,10,26].

Otra de las fases que podemos encontrar en las ferritas son los óxidos de perovskita, las estructuras de perovskita son un sistema cristalino cúbico con la fórmula general ABO_3 (donde A es un metal incorporado) es un tipo de estructura que se encuentra con frecuencia en la química inorgánica [27,28]. En particular, los materiales de perovskita ocupan un lugar destacado en el mundo de la ciencia de los materiales debido a sus características muy favorables, como la conductividad estructural, iónica y electrónica, la alta actividad electrocatalítica y la alta estabilidad termodinámica [28]. Se utilizan inmensamente como materiales de electrodos para celdas de combustible de óxido sólido, baterías, membranas permeables al oxígeno, generadores de oxígeno impulsados por presión y sistemas electrolíticos de agua [28,29].

La elección del estroncio como elemento catiónico para la ferrita se debe a que su banda prohibida ha sido reportada de aproximadamente 2.0 eV para la estructura en fase espinela [6,10,26]; mientras que en la estructura de perovskita la banda

prohibida de este material es de aproximadamente 1.80 eV [30]. Además, el estroncio, es considerado por su gran estabilidad en propiedades de absorción, magnéticas y su alta actividad y sensibilidad catalíticas [6,24], así como por su bajo costo en la producción de las estructuras previamente mencionadas. [6,23,25,26,29,31]. Se tiene interés en la estructura tipo perovskita debido a la fuerte deficiencia de oxígeno en su composición para diversas aplicaciones, esta característica le otorga una amplia gama de no estequiometría, lo cual implica que presente diferentes estados de oxidación para los cationes de hierro, y la presencia de vacantes de oxígeno hace que este sistema sea atractivo para la catálisis [32].

La morfología, así como las propiedades estructurales, magnéticas y el tamaño de partícula de un polvo, dependen en gran medida del método de síntesis [6,24,26]. Existen diversas rutas de síntesis para los materiales tipo ferrita, tales como los métodos térmicos, de coprecipitación, sol-gel y de estado sólido [2,8,10,24,26,31]. Sin embargo, el método sol-gel ofrece varias ventajas, ya que la mezcla homogénea de los componentes permite un mejor control de la estequiometría, alta pureza y rentabilidad siendo estas características importantes para las estructuras de ferrita [24,26,31,33,34].

Seccion 3: Justificación, Hipótesis y Objetivos

Justificación

La producción de energía por medio de combustibles fósiles ha reflejado un gran impacto en el calentamiento global, por lo cual, la búsqueda de combustibles capaces de satisfacer la demanda energética y con contribución a una descarbonización son de gran importancia; la obtención de hidrógeno por procesos fotocatalíticos es una de las vías más prometedoras para la obtención de energías renovables que puedan sustituir de manera adecuada y eficaz debido al uso de energías renovables y cero emisiones de carbono en los procesos de producción.

Aunque existen diversos métodos de producción de hidrógeno, muchos de ellos presentan desventajas como la generación de dióxido de carbono o la dependencia de fuentes de energía no renovables. Los métodos fotocatalíticos, en particular el fotoreformado de compuestos de biomasa como el bioetanol, emergen como una alternativa prometedora para la producción sostenible de hidrógeno, la eficiencia de este proceso puede potenciarse significativamente mediante el diseño y optimización de fotocatalizadores, que aprovechen la energía solar. El uso de semiconductores en el fotoreformado es clave, dentro de esta categoría, las ferritas son materiales que destacan debido a sus propiedades, principalmente por poseer bandas de energía prohibida relativamente bajas (aproximadamente en un rango de entre $1.0 \text{ eV} < E_g < 2.0 \text{ eV}$), esta característica es muy importante para aplicaciones fotocatalíticas. Dado que propiedades fisicoquímicas varían según su estructura y el metal incorporado, estos materiales han sido estudiados para la producción de hidrógeno. En particular, las ferritas en fase espinela (MFe_2O_4) han resultado de gran interés debido a su capacidad de absorber más luz visible, su estabilidad estructural y su razonable costo de producción. Las estructuras de perovskita (ABO_3) también son importantes por su conductividad y alta estabilidad, por lo cual, se han utiliza en diversas aplicaciones. En particular la ferrita de estroncio, que ha demostrado por poseer excelentes propiedades magnéticas y ópticas. Estas propiedades se ven potenciadas en sus diferentes fases, como la fase espinela (SrFe_2O_4) y la fase perovskita (SrFeO_3) además poseen una estructura de banda prohibida con valores de aproximadamente 2.0 eV para la SrFe_2O_4 y de 1.80 eV para la SrFeO_3 , además la ferrita de estroncio es atractiva por su estabilidad, alta actividad catalítica y bajo costo. Por lo cual es importante comparar qué fase presenta mejores propiedades para el fotoreformado de bioetanol y en la producción de hidrógeno, además, el método de síntesis desempeña un papel muy importante, ya que influye en las propiedades estructurales y funcionales de estos materiales, por lo cual el sol-gel es una de las mejores opciones para la obtención de estos mismos.

Hipótesis

La ferrita de estroncio fase espinela (SrFe_2O_4) sintetizada mediante el método sol-gel modificado con Pechini presentará un tamaño de cristalita menor (≤ 30 nm) y producirá al menos 20 % más hidrógeno ($\mu\text{mol H}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) en el reformado fotocatalítico de bioetanol bajo luz visible, en comparación con la ferrita de estroncio fase perovskita (SrFeO_3) preparada por sol-gel convencional.

Objetivo general

Sintetizar y evaluar comparativamente las diferentes fases ferrita de estroncio—espinela (SrFe_2O_4) y perovskita (SrFeO_3)— así como en sus propiedades estructurales, texturales, ópticas y en su desempeño como fotocatalizadores en el reformado de bioetanol para la producción de hidrógeno bajo luz visible.

Objetivos específicos

- Sintetizar ferrita de estroncio en fase espinela y perovskita mediante el método sol-gel.
- Caracterizar la ferrita de estroncio por Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido, Espectroscopia de Reflectancia Difusa y BET.
- Evaluar la actividad fotocatalítica para reformado de bioetanol de las ferritas sintetizadas por cromatografía de gases.
- Correlacionar las propiedades estructurales, texturales y ópticas con el desempeño fotocatalítico, identificando los factores que controlan la eficiencia en la generación de H_2 .
- Comparar los resultados de ambas ferritas para determinar cual ofrece la mayor producción de hidrógeno a partir del bioetanol.

Seccion 4: Metodología experimental

4.1 Síntesis de ferrita de estroncio

4.1.1 Síntesis de ferrita de estroncio en fase espinela por el método de sol-gel modificado con Pechini

Para la síntesis se utilizó nitrato de hierro ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) y nitrato de estroncio ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$), así como ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) que actúa como agente quelante y el etilenglicol como agente polimerizante, se realizaron los cálculos para la obtención de 1 gramo de ferrita de estroncio en los cuales se deben agregar nitrato de estroncio y nitrato de hierro en la proporción estequiométrica de 1:2, así teniendo que agregar 0.8037 g de $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ y 3.0686 g de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, de acuerdo a estos valores para el ácido cítrico se pesó 5.8364 g para mantener una relación molar ácido/metal de 2:1, para el etilenglicol la cantidad necesaria es de 5.5 mL; la síntesis se comenzó calentando el etilenglicol en una parrilla de calentamiento a 70°C bajo agitación hasta notar evaporación, para posteriormente agregar el ácido cítrico que debe estar previamente disuelto en 5 mL de agua destilada, se mantuvieron las condiciones de calentamiento y agitación; se diluyen los nitratos en 5 mL de agua destilada cada uno, para posteriormente agregarlos a la mezcla de ácido cítrico-etilenglicol y elevar la temperatura hasta 80°C , una vez evaporada se dejó secar hasta obtener una resina polimérica; para posteriormente calcinarla en el horno en una atmósfera de aire a 400°C durante 2 horas y luego a 700°C durante otras 2 horas (rampa escalonada), para un tiempo total de calcinación de 4 horas [Jiménez-Miramontes et al. (2017)].

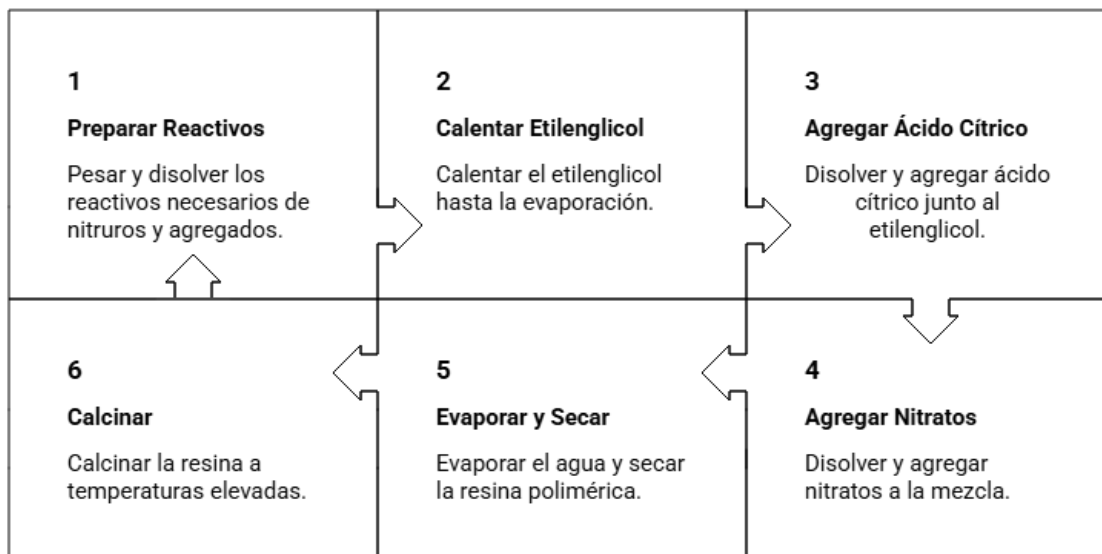


Figura 7.- Diagrama de síntesis de ferrita de estroncio fase espinela

4.1.2 Síntesis de ferrita de estroncio (SrFeO₃) por el método sol-gel

Se realizaron los cálculos para la obtención de 1 gramo de ferrita de estroncio, por lo cual se pesaron las cantidades de 1.5343 g de nitrato de hierro ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) y de 0.8037 g de nitrato de estroncio ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$) las cuales se disolvieron en agua desionizada junto con 4.8154 g de ácido cítrico manteniendo una proporción molar de 1:1:2 en el agua desionizada. Los reactivos se mezclaron durante 1 hora en agitación en una parrilla sin calentamiento, tras lo cual se añadieron 5 mL de etilenglicol a la solución, que continuó agitándose durante otra hora. Posteriormente, la mezcla fue secada en un horno a 130 °C durante 12 horas para obtener un gel seco. Este gel fue molido y sometido a un calentamiento en un horno mufla a 300 °C durante 2 horas. Posteriormente, el material fue calcinado a 800 °C durante 3 horas. Finalmente, el producto obtenido fue molido para obtener un polvo negro [Augustin et al. (2003)].

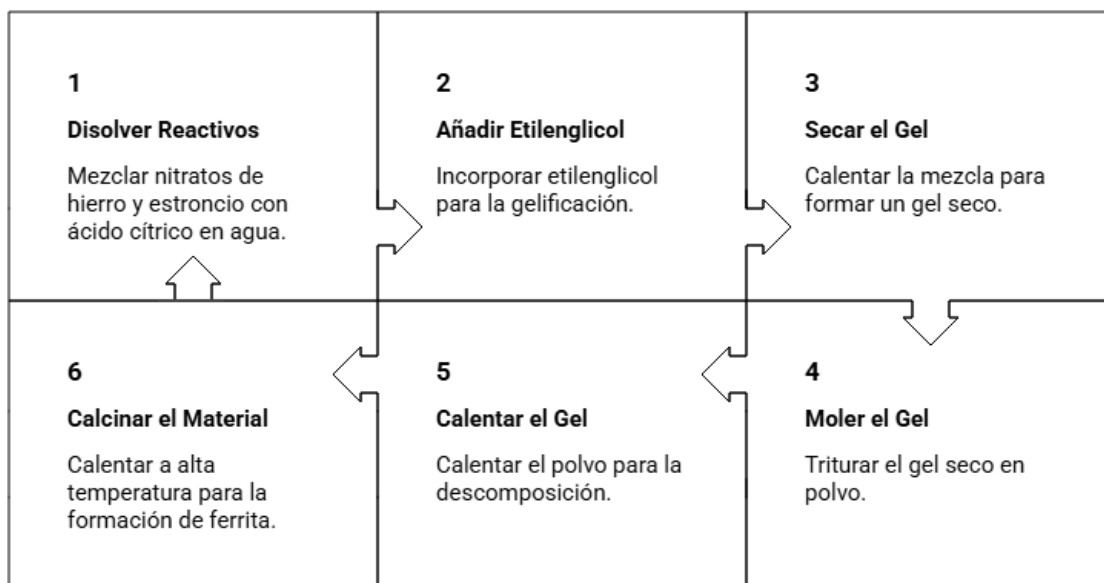


Figura 8.- Diagrama de síntesis de ferrita de estroncio fase perovskita

4.2 Técnicas de caracterización

4.2.1 Difracción de Rayos X

Se realizó para la determinación de la estructura cristalina a través del análisis de difracción de rayos X por medio del difractómetro PANalytical (Figura 7) con un paso de 0.01 °/s en un rango de 5 a 90 grados, con el cual se pudo determinar la fase cristalina utilizando la ley de Bragg, la cual corresponde a la siguiente ecuación

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

d = Distancia interplanar del cristal

θ = Angulo de difracción

λ = Longitud de onda de los rayos X

La cual nos dice que gracias a la reflexión de los planos de átomos de la red cristalina en la estructura del material podemos obtener los picos de intensidad característicos que permiten la identificación de los materiales, cuando el ángulo de incidencia no cumple la ley de Bragg, no produce una señal, lo que resulta en ausencia de picos de difracción.



Figura 9.- Difractor de Rayos X marca PANalytical, modelo X'Pert PRO

4.2.2 Microscopía Electrónica de Transmisión

La microscopia electrónica de transmisión se usó para el análisis morfológico, tamaño cristalino y mapeo elemental por EDS (Energy dispersive X-ray Spectroscopy por sus siglas en inglés) con el equipo TEM JEOL JEM 2200FS+CS modo STEM (Figura 8), las muestras se montaron en rejillas porta muestras de cobre recubiertas con carbón las cuales fueron agregadas con una solución diluida de cada una de las ferritas con metanol.



Figura 10.- Equipo TEM JEOL JEM 2200FS+CS

4.2.3 Espectroscopía de Reflectancia Difusa

Para la obtención de las espectroscopías de reflectancia difusa se realizó una espectroscopía UV-Vis en modo reflectancia, en un rango de longitud de onda de 190 nm a 1100 nm en el espectrómetro Perkin Elmer Lambda 35 (Figura 9), al cual se le aplica la teoría de Kubelka-Munk que sigue la siguiente ecuación

$$F(R) = \frac{K}{S} \rightarrow F(R) = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

R= Reflectancia de la muestra

K= Coeficiente de absorción

S= Coeficiente de dispersión

Así logrando obtener la reflectancia difusa de las muestras, con esta información se obtuvo la banda prohibida aplicando la gráfica de Tauc la cual consiste en $(F(R) * h\nu)^2 = B(h\nu - E_g)$



Figura 11.- Equipo de espectrometría Perkin Elmer Lambda 35

4.2.4 Área superficial (Análisis BET)

Para el análisis del área superficial se empleó el método de fisisorción de nitrógeno en una presión relativa (p/p_0) de 0.05 hasta 0.9, posteriormente aplicando el método de Brunauer-Emmett-Teller (BET) en una presión relativa de 0.05 hasta 0.3, todo esto en el equipo 3P Instruments Modelo Micro 200 (Figura 10), previamente se realizó una desgasificación del material con condiciones de 350°C por 2 horas para la realización de este análisis.



Figura 12.- Equipo BET Marca 3P Instruments Modelo Micro 200

4.3 Evaluación fotocatalítica

La evaluación de las muestras como fotocatalizadores se realizó midiendo la evolución de hidrógeno con la técnica de cromatografía de gases en un Cromatógrafo Clarus 500 Perkin Elmer (Figura 11), el sistema utilizado para llevar a cabo la separación de la molécula orgánica consistió en un reactor con tubo de cuarzo de 20 cm de largo y 4 cm de diámetro con tapas de aluminio en los extremos y una toma de muestra en uno de ellos. El reactor fue sellado por medio de unas varillas de acero que presionaron unas membranas en los extremos del tubo, permitiendo un sellado hermético. Dentro del reactor se colocó un agitador magnético, agua destilada con etanol como agente de sacrificio y 0.2 gramos de muestra para cada evaluación. La mezcla fue irradiada por una lámpara, manteniendo en agitación constante durante todo el periodo de evaluación fotocatalítica.



Figura 13.- Cromatógrafo Clarus 500 Perkin Elmer

Seccion 5: Discusión y Resultados

5.1 Difracción de Rayos X

Los difractogramas obtenidos fueron agregados al software de identificación para DRX “Match!” utilizando el International Centre of Diffraction Data (ICDD por sus siglas) para la SrFe_2O_4 el ICDD 00-001-1027, para la muestra de SrFeO_{3-x} con una coincidencia con la carta de polvos de $\text{SrFeO}_{2.86}$ siendo el ICDD 00-039-0954, como

se observa en la Figura 7 donde se muestran coincidencias de las señales con las fichas;

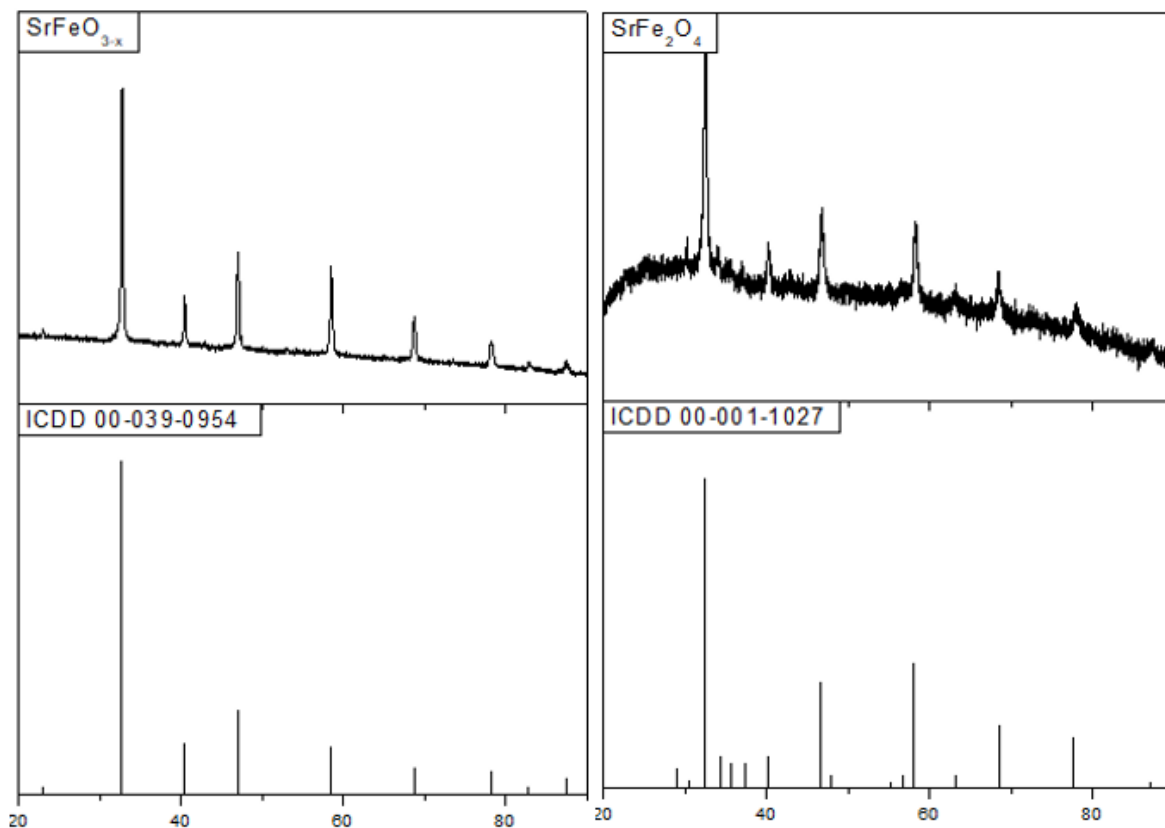


Figura 14.- Patrones de difracción de rayos X de las muestras sintetizadas

En esta Figura se pueden observar los patrones de difracción de la muestra, la presencia de los picos representativos del material y el ensanchamiento en los picos de la muestra sintetizada para la estructura tipo espinela (SrFe_2O_4), lo que indica que hay una amplia distribución de tamaño de cristalito en el material [Ghahfarokhi et al (2018)]. Mientras que para la muestra de $\text{SrFeO}_{2.86}$, la cual presenta una mejor cristalinidad, mostrando señales muy afiladas, se asocia con cristalitos de tamaño mayor; estas diferencias de tamaño de cristalito y cristalinidad son atribuidas al tiempo y temperaturas de calcinación según lo reportado por Casbeer, quienes reportan que entre más tiempo de calcinación y mayor temperatura se favorece la cristalinidad. A partir de los difractogramas obtenidos de cada fase se calculó el tamaño de cristal utilizando la ecuación de Scherrer:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

Donde k es la constante de Scherrer (0.94), λ es la longitud de onda de la radiación proveniente de la lámpara de cobre del difractómetro (0.154 nm), β es el ancho a la altura media del pico (FWHM), θ es el ángulo del pico con mayor intensidad y dividido entre 2, y la D es el tamaño de cristalito calculado en nanómetros.

Los resultados se observan en la Tabla 2

Tabla 2.- Tamaño de cristalito

Fase	D (nm)
SrFe₂O₄	11.1
SrFeO_{3-x}	33.7

La Tabla 2 presenta una aproximación del tamaño de cristal de 11 nm para SrFe₂O₄ y 33 nm para SrFeO_{3-x}, con estos resultados se puede inferir que esta diferencia se debe a la temperatura de calcinación, los cuales favorecieron el crecimiento del cristal en la fase perovskita, obteniendo tamaños del triple.

5.2 Microscopia Electrónica de Transmisión (TEM)

Se obtuvieron micrografías de ambas muestras sintetizadas, en las micrografías que se muestran en la Figura 8 las cuales son de la muestra sintetizada de SrFe₂O₄ estas se presentan de forma aglomerada, este fenómeno se debe a la sinterización del material como lo reporta Jiménez-Miramontes et al. (2017) otra de las razones por la cual se puede encontrar así es al comportamiento magnético del material como lo reporta Ghahfarokhi et al. (2018), de igual forma se puede observar en regiones pequeñas la forma cristalina cubica lo cual concuerda con lo reportado por

Jiménez-Miramontes et al. (2017) la cual es la estructura característica del material; estas presentan un tamaño promedio de partícula de entre 20 y 40 nm.

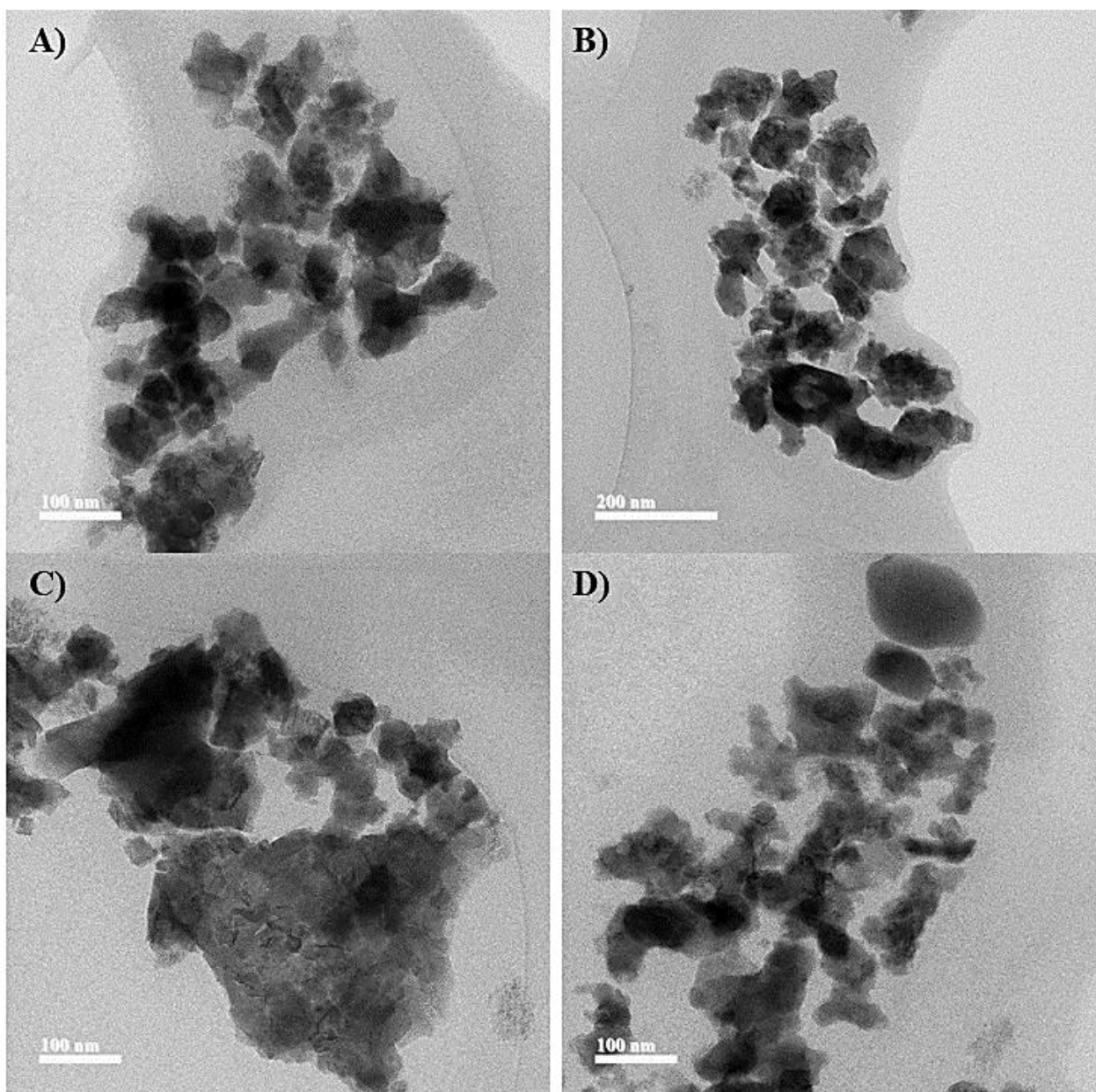


Figura 15.- Micrografías modo STEM de múltiples regiones de la muestra SrFe₂O₄ A) Región 1, B) Región 2, C) Región 3 y D) Región 4

A diferencia de las micrografías que se observan en la Figura 9 que corresponden a la muestra de SrFeO_{3-x}, pueden observarse aglomeraciones de partículas con morfología cúbica y tamaños que varían entre 20 y 35 nm. Estos resultados son consistentes con los reportados por Agustín et al. (2003), quienes atribuyen este comportamiento al proceso de sinterización que experimenta el material durante la

etapa de calcinación. De manera similar a lo observado en la espinela, Ghahfarokhi et al. (2018) sugieren que dicha aglomeración también puede estar relacionada con las propiedades magnéticas del material; se distingue de mejor manera la estructura cristalina cúbica del material concordando con Augustin et al. (2003); las partículas presentan tamaños de entre 20 nm y 35 nm, como se puede observar en la Figura 10.

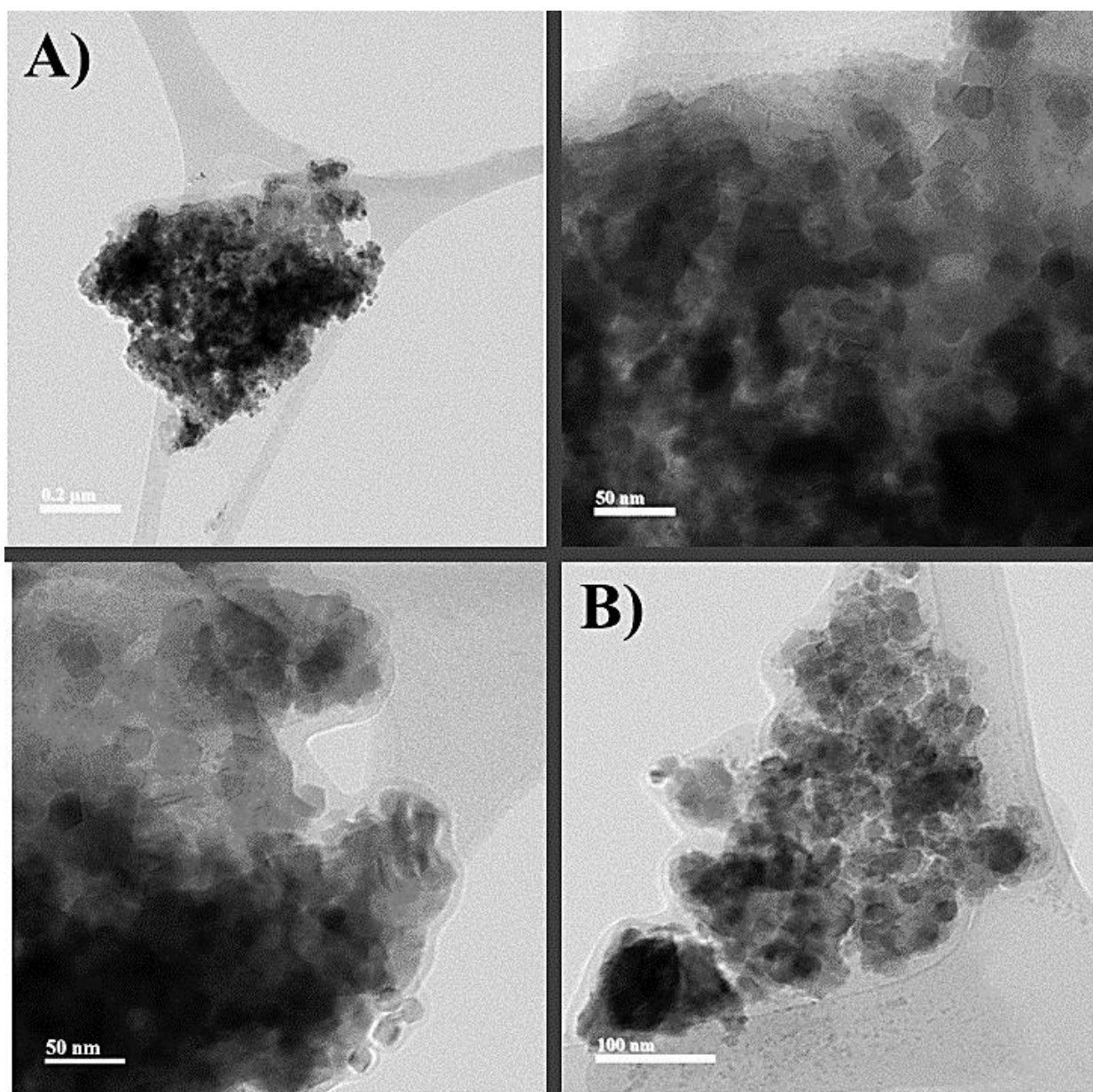


Figura 16.- Micrografías modo STEM de la muestra SrFeO_{3-x} A) Región 1 y aumentos, B) Región 2

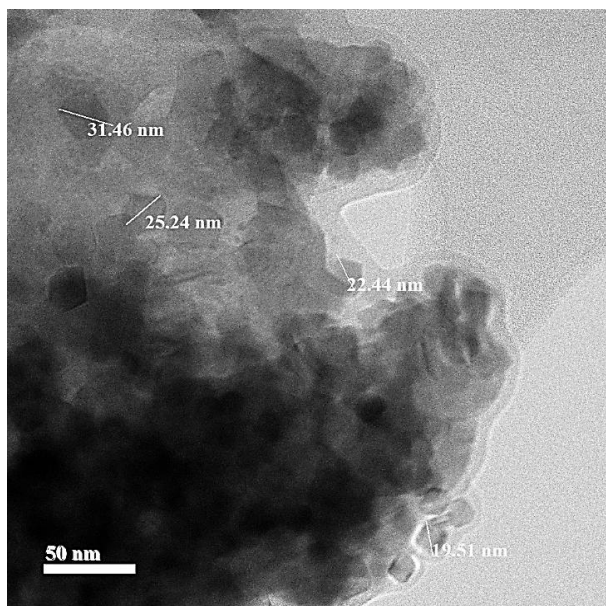


Figura 17.- Micrografía con mediciones de las muestras de SrFeO_{3-x}

Para ambas muestras se obtuvieron mapeos elementales por EDS (Energy dispersive X-ray Spectroscopy por su nombre en inglés), los cuales se observan en la Figura 11 (correspondiendo a la Figura 8B y la Figura 9A); en estos mapeos se aprecia la composición de los elementos de las ferritas de estroncio (estroncio, hierro, oxígeno), por lo cual, las micrografías obtenidas de las muestras coinciden con nuestro material. Ambas presentan una distribución homogénea de los elementos lo que sugiere una dispersión uniforme en el material, en estas no se encontró presencia de residuos o algún material distinto, por lo cual, tenemos materiales con buena pureza.

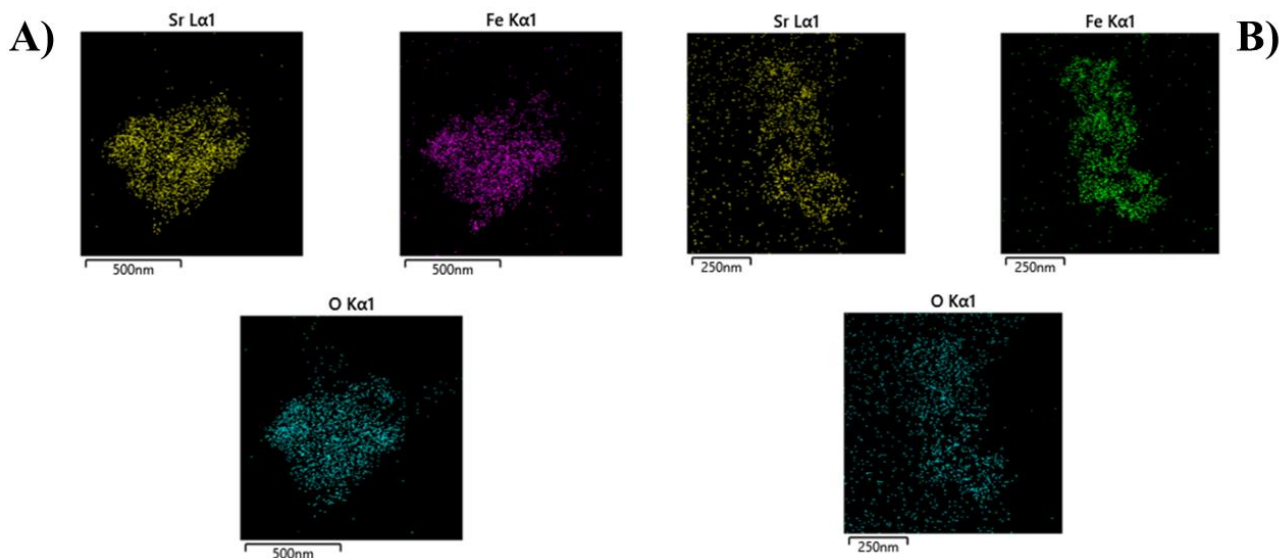


Figura 18.- Mapeo elemental EDS de la muestra A) SrFeO_{3-x} y B) SrFe_2O_4

5.3 Espectroscopia de Reflectancia Difusa

Los resultados obtenidos mediante reflectancia difusa por espectrofotometría UV-Vis pueden relacionarse con la absorbancia aparente del material a través de la función de Kubelka–Munk ($F(R)$). Para determinar la energía de la brecha prohibida, se aplica la relación de Tauc, graficando $(F(R) \cdot E)^n$ en función de la energía del fotón ($E = hc/\lambda$), donde el exponente n depende del tipo de transición electrónica: $n=2$ para una transición directa permitida y $n=1/2$ para una transición indirecta permitida. De acuerdo con la literatura [2, 7, 30], ambos materiales presentan una transición directa ($n=2$).

La extrapolación lineal de la región ascendente de la gráfica de Tauc hasta el eje de energía (E) permite obtener el valor de la energía de la banda prohibida (E_g). Siguiendo este procedimiento, se determinó un band gap aproximado de 1.8 eV para la muestra de SrFeO_3 , en concordancia con lo reportado por Hu et al. (2022) y

un valor de 2.1 eV para la muestra de SrFe_2O_4 , coincidiendo con lo mencionado por Vijayaraghavan et al. (2016).

La Figura 12 muestra las gráficas de Tauc correspondientes a ambos materiales, donde puede observarse que los valores de energía obtenidos se encuentran dentro del rango típico de los materiales semiconductores, lo que confirma la naturaleza esperada de las fases sintetizadas.

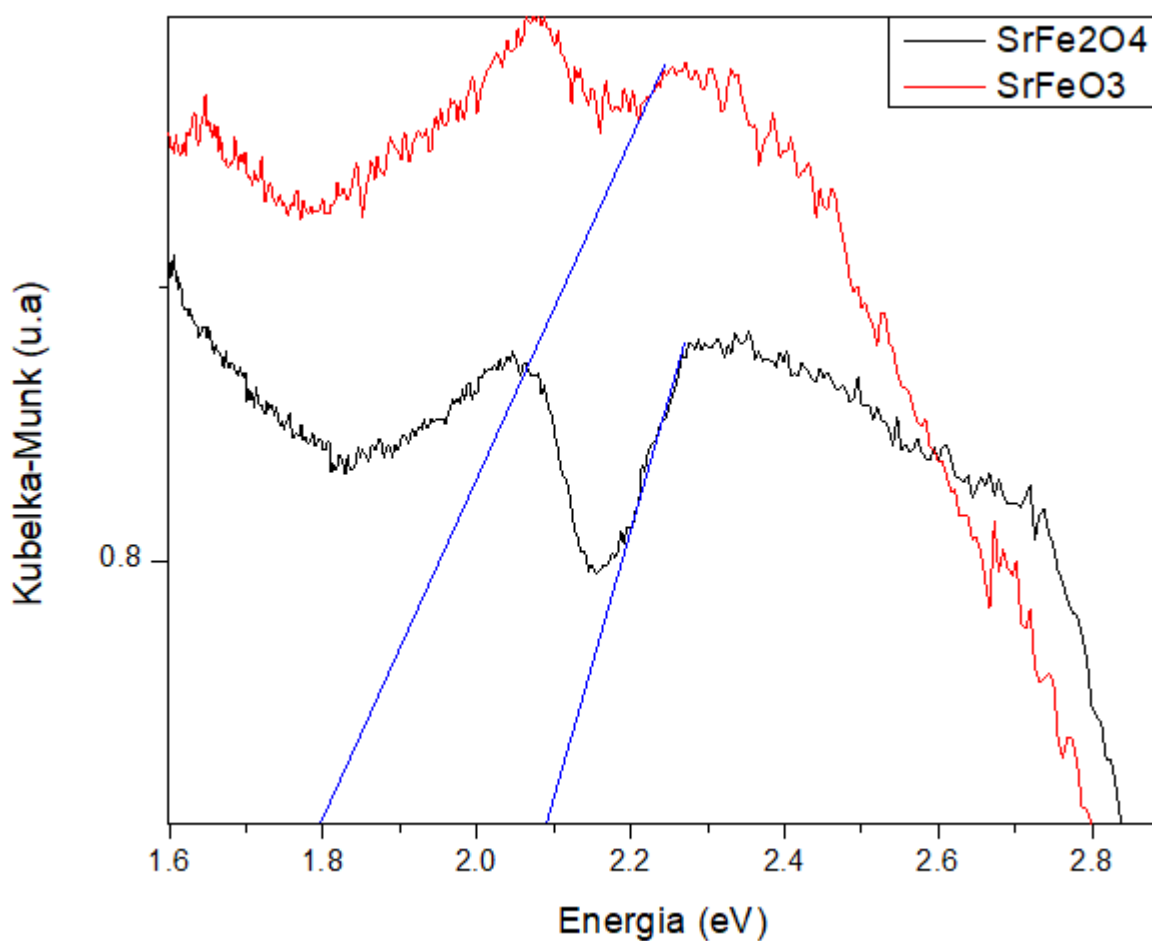


Figura 19.- Grafica de Kubelka-Munk con las energías de las muestras

5.4 Análisis BET

Para el análisis BET se realizaron pruebas de fisisorción de N_2 , obteniéndose las isotermas de adsorción-desorción correspondientes a los materiales $SrFe_2O_4$ y $SrFeO_3$. En ambos casos se observa la ausencia de histéresis, característica de una isoterma de tipo III, como se muestra en los gráficos de la Figura 13. Este comportamiento indica que los materiales no presentan porosidad, en concordancia con lo reportado por Jiménez-Miramontes et al. (2017).

Los valores de área superficial específica para las muestras de $SrFe_2O_4$ y $SrFeO_3$ se presentan en la Tabla 3. Dichos valores, que exhiben áreas superficiales relativamente bajas, se pueden considerar que están directamente influenciados por el tamaño de partícula y el proceso de sinterización de ambas fases, lo que provoca la aglomeración del material, tal como lo señalan Jiménez-Miramontes et al. (2017).

Tabla 3.- Área superficial de las muestras.

Muestras	Área superficial (m^2/g)
$SrFe_2O_4$	13.014
$SrFeO_{3-x}$	6.417

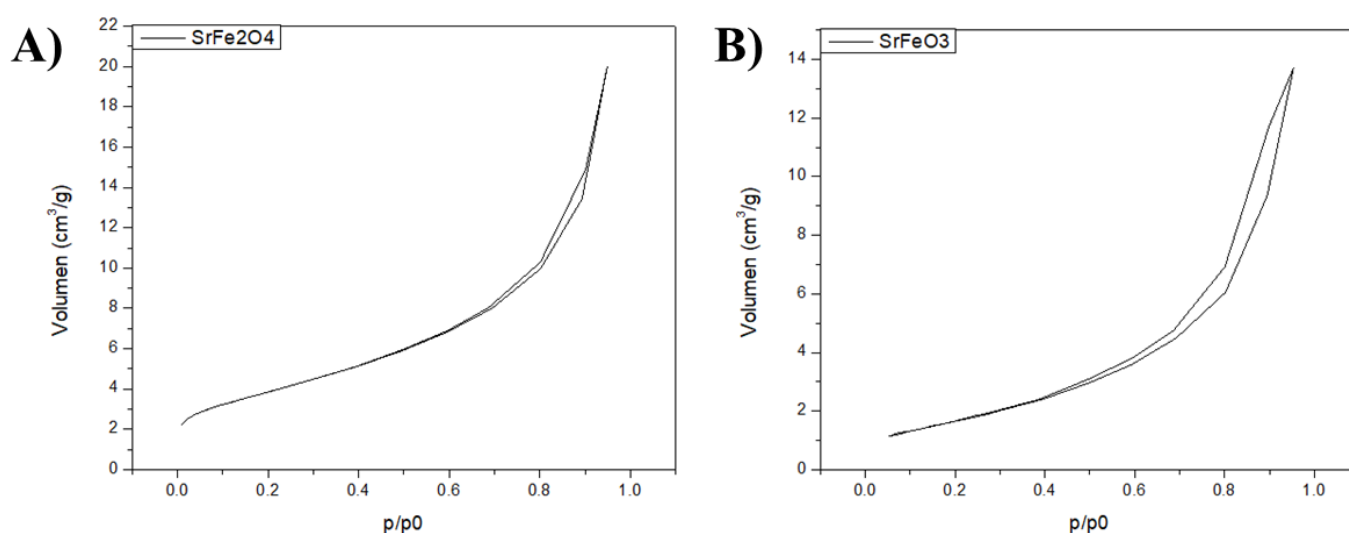


Figura 20.- Gráficas Isotermas obtenidas del Análisis BET A) $SrFe_2O_4$ y B) $SrFeO_{3-x}$

5.5 Evaluación Fotocatalítica

La Figura 14 presenta los resultados de la producción de hidrógeno vía fotocátalisis para ambos materiales. La muestra de SrFe_2O_4 exhibió una producción de $8.7 \mu\text{mol H}_2/\text{g}$ después de 8 horas de irradiación. Por otro lado, la muestra de SrFeO_3 presentó una producción de hidrógeno superior a la de la fase espinela, obteniendo $10.3 \mu\text{mol H}_2/\text{g}$ a las 8 horas. Esta tendencia es consistente con la que reportan Jiménez-Miramontes et al. (2017).

Aunque la fase espinela (SrFe_2O_4) presenta un área superficial aproximadamente del doble en comparación con la fase perovskita (SrFeO_3), su producción total de hidrógeno resulta un 15% menor. Este resultado indica que el área superficial, si bien influye en la actividad fotocatalítica al aumentar el número de sitios activos disponibles, no es el único factor determinante del rendimiento.

Para comprender mejor el comportamiento de ambas fases, se calculó la actividad intrínseca, expresada como la cantidad de hidrógeno producido por unidad de área ($\mu\text{mol H}_2/\text{m}^2$). Este parámetro permite comparar la eficiencia real de los materiales, independientemente de su superficie específica. Los valores obtenidos fueron de $0.67 \mu\text{mol H}_2/\text{m}^2$ para SrFe_2O_4 y $1.7 \mu\text{mol H}_2/\text{m}^2$ para SrFeO_3 , lo que evidencia que la perovskita es más activa intrínsecamente.

Este comportamiento puede explicarse considerando varios aspectos estructurales y electrónicos: 1) por la estructura cristalina; ya que la perovskita SrFeO_3 posee una red más abierta y flexible que facilita la movilidad de las cargas fotoexcitadas, reduciendo la recombinación de pares electrón-hueco. 2) por el valor de la energía de banda prohibida (E_g), puesto que hay una ligera diferencia en E_g , el cual puede favorecer una mayor absorción en el rango visible para SrFeO_3 , lo que incrementa su aprovechamiento de la radiación incidente.

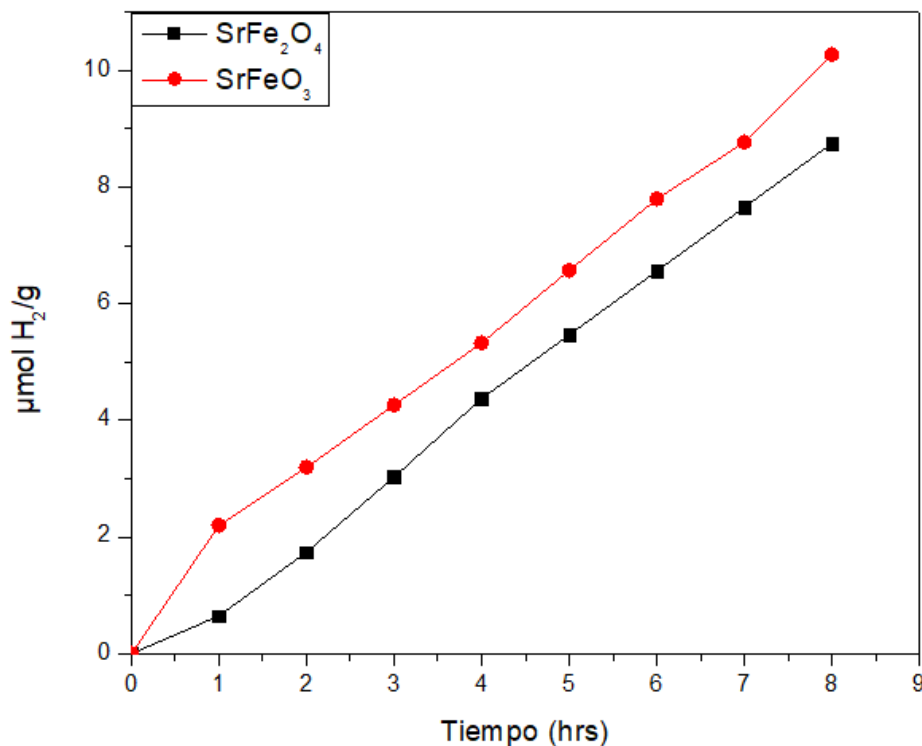


Figura 21.- Graficas de producción de hidrógeno en 8 horas de las muestras

La fase perovskita es un material muy utilizado y con buenos resultados en la descomposición de colorantes por medio de fotocátalisis como ha sido reportado por Ghaffari et al. (2022) y Hu et al. (2010), además, durante el trabajo presentado demostró una mejor morfología y estructura cristalina en comparación con la fase espinela; la banda de energía prohibida de la fase perovskita es mayor y abarca más región del potencial redox, favoreciendo la reducción y oxidación de la sustancia en la producción de hidrógeno [Jiménez-Miramontes et al. (2017)]; aunque ambos materiales presentaban aglomeración y la fase perovskita una menor área superficial, la posible existencia de vacancias de oxígeno puede ser una razón para una mayor producción de hidrógeno, así como favorece la descomposición de colorantes como lo han reportado Hu et al. (2010) y Naveenkumar et al. (2014)

Seccion 6: Conclusiones

6.1 Conclusiones

- Ambas fases fueron sintetizadas mediante el método sol-gel, obteniéndose materiales sin la presencia de fases secundarias. Los resultados de fisisorción indican que ambos compuestos son no porosos, lo cual se atribuye al proceso de sinterización que ocurre durante la síntesis, lo cual conduce a una notable aglomeración de partículas y, por consiguiente, a bajas áreas superficiales específicas: $6 \text{ m}^2/\text{g}$ para la fase perovskita y $13 \text{ m}^2/\text{g}$ para la fase espinela.
- En cuanto a la producción de hidrógeno, la fase perovskita mostró un desempeño superior, alcanzando $10 \text{ } \mu\text{mol H}_2/\text{g}$, mientras que la fase espinela produjo $8 \text{ } \mu\text{mol H}_2/\text{g}$. Esta tendencia se confirma al analizar la actividad intrínseca, expresada como la cantidad de hidrógeno generado por unidad de área: $0.67 \text{ } \mu\text{mol H}_2/\text{m}^2$ para SrFe_2O_4 y $1.7 \text{ } \mu\text{mol H}_2/\text{m}^2$ para SrFeO_3 .
- Estos resultados evidencian que, a pesar de su menor área superficial, la fase perovskita (SrFeO_3) presenta una mayor actividad intrínseca, lo que se traduce en un mejor desempeño fotocatalítico durante el fotorreformado de bioetanol en comparación con la fase espinela (SrFe_2O_4). Esto sugiere que las propiedades electrónicas y estructurales de la perovskita favorecen una separación más eficiente de las cargas fotoinducidas y una mayor capacidad de reacción en la superficie activa.
- La muestra de SrFe_2O_4 presenta tamaños ligeramente mayores y variados respecto a la muestra de SrFeO_{3-x} además de una estructura cristalina cubica más notable; estas se encuentran de forma aglomerada debido a efectos de sinterización.
- La fase perovskita (SrFeO_{3-x}) y la fase espinela (SrFe_2O_4) presentan un band gap aproximado de $\sim 1.8 \text{ eV}$ y de $\sim 2.1 \text{ eV}$ respectivamente, los cuales son adecuados para un proceso de fotocatalisis.

6.2 Trabajo a futuro

- Realizar dopaje para comprobar sus contribuciones en el rendimiento del material.
- Optimizar los parámetros del método sol-gel como pH, agentes quelante, para mejorar propiedades.
- Buscar métodos de síntesis alternos que favorezcan la estructura del material y el incremento de áreas superficiales.
- Análisis de las posibles vacancias de oxígeno en la fase tipo perovskita y su efecto en la producción de hidrógeno.

Seccion 7: Referencias

1. Ćwieka, K., Czelej, K., Colmenares, J. C., Jabłczyńska, K., Werner, Ł., & Gradoń, L. (2021). Supported Plasmonic Nanocatalysts for Hydrogen Production by Wet and Dry Photoreforming of Biomass and Biogas Derived Compounds: Recent Progress and Future Perspectives. *ChemCatChem*, 13(21), 4458-4496. <https://doi.org/10.1002/cctc.202101006>
2. Jiménez-Miramontes, J., Domínguez-Arvizu, J., Salinas-Gutiérrez, J., Meléndez-Zaragoza, M., López-Ortiz, A., & Collins-Martínez, V. (2017). Synthesis, characterization and photocatalytic evaluation of strontium ferrites towards H₂ production by water splitting under visible light irradiation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(51), 30257-30266. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.162>
3. Banerjee, D., Kushwaha, N., Shetti, N. P., Aminabhavi, T. M., & Ahmad, E. (2022). Green hydrogen production via photo-reforming of bio-renewable resources. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 167, 112827. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112827>
4. Rossetti, I. (2012). Hydrogen Production by Photoreforming of Renewable Substrates. *ISRN Chemical Engineering*, 2012, 1-21. <https://doi.org/10.5402/2012/964936>
5. Ortega, D. R., Araque, D. C. G., Peña, P. A., & Zanella-Specia, R. (2024). Producción fotocatalítica de hidrógeno empleando semiconductores modificados con nanopartículas metálicas. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria En Nanociencia y Nanotecnología*, 17(33), 1e-27e. <https://doi.org/10.22201/cei-ich.24485691e.2024.33.69825>
6. Sólyom, J. (2009). Electronic structure of semiconductors [Libro Digital]. En *Fundamentals of the Physics of solids* (Vol. 2). Springer.
7. Vijayaraghavan, T., Suriyaraj, S., Selvakumar, R., Venkateswaran, R., & Ashok, A. (2016). Rapid and efficient visible light photocatalytic dye degradation using AFe₂O₄ (A = Ba, Ca and Sr) complex oxides. *Materials Science and Engineering B*, 210, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.04.005>

8. Sharma, E., Thakur, V., Sangar, S., & Singh, K. (2020). Recent progress on heterostructures of photocatalysts for environmental remediation. *Materials Today Proceedings*, 32, 584-593. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.403>
9. Gobara, H. M., Nassar, I. M., Naggar, A. M. E., & Eshaq, G. (2017). Nanocrystalline spinel ferrite for an enriched production of hydrogen through a solar energy stimulated water splitting process. *Energy*, 118, 1234-1242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.001>
10. Dillert, R., Taffa, D. H., Wark, M., Bredow, T., & Bahnemann, D. W. (2015). Research Update: Photoelectrochemical water splitting and photocatalytic hydrogen production using ferrites (MFe_2O_4) under visible light irradiation. *APL Materials*, 3(10). <https://doi.org/10.1063/1.4931763>
11. Casbeer, E., Sharma, V. K., & Li, X. (2012). Synthesis and photocatalytic activity of ferrites under visible light: A review. *Separation And Purification Technology*, 87, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.11.034>
12. Alvear, D., Galeas, S., Guerrero, V.H., & Debut, A. (2017). Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita. *Revista Politécnica*, 39(2), 61-66. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292017000200061&lng=es&tlng=es.
13. Farrera, L. (2008). Conductores semiconductores y aislantes. *Universidad Autónoma. México*. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/_27503.pdf.
14. Candal, R. J., Bilmes, S. A., & Blesa, M. A. (2001). Semiconductores con actividad fotocatalítica. *Red CYTED VIII-G*, 79-101.
15. Kittel, C. (2003). Cristales semiconductores [Libro Digital]. En *Introducción a la física del Estado sólido* (3.^a ed.). EDITORIAL REVERTE.
16. Abrica-González, P., & Gómez-Arroyo, S. (2022). EFECTOS y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS (NP-CUO, ZNO) EN PLANTAS. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 145-164. <https://doi.org/10.20937/rica.54303>
17. Zanella, Rodolfo. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. Mundo nano. *Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 5(1), 69-81.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912012000100069&lng=es&tlng=es.

18. Gómez Villarraga, F. G. (2016, 22 julio). NANOPARTÍCULAS METÁLICAS Y SUS APLICACIONES. Innovacion y Ciencia. https://innovacionyciencia.com/documentos/nanoparticulas_metalicas_y_sus_aplicaciones.pdf
19. Samsudin, N. A., Lim, Y., Chang, S., Heng, I., Low, F. W., Shakeri, M., Lai, C. W., Asim, N., Amin, N., Tiong, S. K., & Pasupuleti, J. (2021). Titanium dioxide nanostructured based supercapacitors. En *Elsevier eBooks* (pp. 361-373). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819723-3.00030-5>
20. Liao, C., Huang, C., & Wu, J. C. S. (2012). Hydrogen Production from Semiconductor-based Photocatalysis via Water Splitting. *Catalysts*, 2(4), 490-516. <https://doi.org/10.3390/catal2040490>
21. Mohanta, O., Singhababu, Y., Giri, S., Dadhich, D., Das, N., & Sahu, R. (2013). Degradation of Congo red pollutants using microwave derived SrFe₁₂O₁₉: An efficient magnetic photocatalyst under visible light. *Journal Of Alloys and Compounds*, 564, 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.02.074>
22. Hankare, P., Sankpal, U., Patil, R., Mulla, I., Sasikala, R., Tripathi, A., & Garadkar, K. (2010). Synthesis and characterization of nanocrystalline zinc substituted nickel ferrites. *Journal Of Alloys and Compounds*, 496(1-2), 256-260. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.01.009>
23. Helaïli, N., Bessekhoud, Y., Bachari, K., & Trari, M. (2014). Synthesis and physical properties of the CuFe_{2-x}Mn_xO₄ (0 ≤ x ≤ 2) solid solution. *Materials Chemistry And Physics*, 148(3), 734-743. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.08.042>
24. Candeia, R., Souza, M., Bernardi, M., Maestrelli, S., Santos, I., Souza, A., & Longo, E. (2007). Monoferrite BaFe₂O₄ applied as ceramic pigment. *Ceramics International*, 33(4), 521-525. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.10.018>
25. Zhang, D., & Zhang, L. (2016). Ultrasonic-assisted sol-gel synthesis of rugby-shaped SrFe₂O₄/reduced graphene oxide hybrid as versatile visible light photocatalyst. *Journal of the Taiwan Institute Of Chemical Engineers*, 69, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.10.015>

26. Jia, T. X., Yan, S. F., & Liu, Z. L. (2011). Preparation and Catalytic Properties of SrFe_2O_4 in Selective Oxidation. *Advanced Materials Research*, 396-398, 751-754. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.396-398.751>
27. Li, D., Sun, Y., Gao, P., Zhang, X., & Ge, H. (2014). Structural and magnetic properties of nickel ferrite nanoparticles synthesized via a template-assisted sol-gel method. *Ceramics International*, 40(10), 16529-16534. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.08.006>
28. Yang, Y., Cao, Z., Jiang, Y., Liu, L., & Sun, Y. (2006). Photoinduced structural transformation of SrFeO_3 and $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ during photodegradation of methyl orange. *Materials Science And Engineering B*, 132(3), 311-314. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.03.031>
29. Augustin, C., Berchmans, L., & Selvan, R. K. (2003). Structural, electrical and electrochemical properties of co-precipitated $\text{SrFeO}_{3-\delta}$. *Materials Letters*, 58(7-8), 1260-1266. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.09.018>
30. Hu, S., Yuan, J., Tang, S., Luo, D., Shen, Q., Qin, Y., Zhou, J., Tang, Q., Chen, S., Luo, X., & Xu, D. (2022). Perovskite-type $\text{SrFeO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ S-scheme photocatalyst for enhanced degradation of Acid Red B. *Optical Materials*, 132, 112760. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112760>
31. Ghahfarokhi, S. E. M., Shobegar, E. M., & Shoushtari, M. Z. (2018). Effects of Sintering Temperature on Structural, Morphological and Magnetic Properties of Strontium Ferrite Nanoparticles. *Journal Of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32(4), 1067-1076. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4799-0>
32. Ghaffari, M., Tan, P. Y., Oruc, M. E., Tan, O. K., Tse, M. S., & Shannon, M. (2010). Effect of ball milling on the characteristics of nano structure SrFeO_3 powder for photocatalytic degradation of methylene blue under visible light irradiation and its reaction kinetics. *Catalysis Today*, 161(1), 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.11.031>
33. Naveenkumar, A., Kuruva, P., Shivakumara, C., & Srilakshmi, C. (2014). Mixture of Fuels Approach for the Synthesis of $\text{SrFeO}_{3-\delta}$ Nanocatalyst and Its Impact on the Catalytic Reduction of Nitrobenzene. *Inorganic Chemistry*, 53(22), 12178-12185. <https://doi.org/10.1021/ic502121k>

34. Jaiswal, S. K., Kashyap, V. K., & Kumar, J. (2012). On the sol–gel synthesis and characterization of strontium ferrite ceramic material. *Materials Research Bulletin*, 47(3), 692-699. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2011.12.020>