

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**SÍNTESIS DE SISTEMAS HÍBRIDOS (BIOSOPORTE/CATALIZADOR)
A PARTIR DE ALGAS PARDAS (*SARGASSUM* SP. Y *LOBOPHORA*
SP) Y SU APLICACIÓN EN LA FOTOREDUCCIÓN DE CO₂**

POR

EMIRETH AITANA MELLADO LIRA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

2025

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO
LEÓN PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“SÍNTESIS DE SISTEMAS HÍBRIDOS (BIOSOPORTE/CATALIZADOR) A PARTIR DE ALGAS PARDAS (SARGASSUM SP. Y LOBOPHORA SP) Y SU APLICACIÓN EN LA FOTOREDUCCIÓN DE CO₂”**, que presenta la **BIÓL. EMIRETH AITANA MELLADO LIRA**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**. Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



Dra. Leticia Myriam Torres Guerra

Evaluadora



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO
LEÓN PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es “**SÍNTESIS DE SISTEMAS HÍBRIDOS (BIOSOPORTE/CATALIZADOR) A PARTIR DE ALGAS PARDAS (SARGASSUM SP. Y LOBOPHORA SP) Y SU APLICACIÓN EN LA FOTOREDUCCIÓN DE CO₂**”,

que presenta la **BIÓL. EMIRETH AITANA MELLADO LIRA**, como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA**

AMBIENTAL. Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente

Dra. Edith Luévano Hipólito



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



13-Agosto-2025

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **"SÍNTESIS DE SISTEMAS HÍBRIDOS (BIOSOPORTE/CATALIZADOR) A PARTIR DE ALGAS PARDAS (SARGASSUM SP. Y LOBOPHORA SP) Y SU APLICACIÓN EN LA FOTOREDUCCIÓN DE CO₂"**, que presenta la BIÓL. EMIRETH AITANA MELLADO LIRA, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dra. Luz Idalia Ibarra Rdz

Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE ☒ PROFESOR ☐

NOMBRE: EMIRETH AITANA MELLADO LIRA

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO ☐ TESIS ☒ PI ☐ OTRO ☐

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

SÍNTESIS DE SISTEMAS HÍBRIDOS (BIOSOPORTE/
CATALIZADOR) A PARTIR DE ALGAS PARDAS (SAR-
GASSUM SP. Y LOBOPHORA SP.) Y SU APLICACIÓN EN
LA FOTOREDUCCIÓN DE CO₂.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN
EN LA TESIS IMPRESA.

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba
identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 21 de agosto de 2025



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fic@uanl.mx

Clave: FOR-SPI-14; Revisión: 02; Página 1 de 1

Síntesis de sistemas híbridos (biosoporte/catalizador) a partir del sargazo y su aplicación en la fotoreducción de CO_2

Aprobación de tesis

Dra. Leticia Myriam Torres Guerra

Asesora de tesis

Dra. Edith Luévano Hipólito

Co-asesora de tesis

Dr. Luz Idalia Ibarra Rodríguez

Evaluadora externa

Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Agradecimientos Institucionales

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por financiar mis estudios de maestría mediante la beca otorgada (CVU: 673906), sin la cual no hubiera sido posible realizar mis estudios.

Al **Instituto de Ingeniería Civil** de la **Universidad Autónoma de Nuevo León**, por darme la oportunidad y los espacios para seguir preparándome y estudiar la Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental.

Al **Departamento de Ecomateriales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil**, por facilitarme los recursos e infraestructura para llevar a cabo de forma satisfactoria todo el proyecto.

Al **Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. (CIMAV)** unidad Monterrey, por haber contribuido en el análisis de diferentes muestras, por la técnica de rayos X (DRX), SEM Y EDS que me ayudó a complementar las caracterizaciones de mi trabajo de investigación.

A la **Fundación UANL** por el financiamiento de los vuelos para ir a realizar mi estancia de investigación al Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR) con sede en la Corredoria - Oviedo (Asturias), España.

Al **Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR)**, por haberme permitido realizar una estancia de investigación de 3 meses en sus instalaciones para ampliar mis conocimientos con relación a mi proyecto de investigación.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia, por ser el pilar que me ha sostenido en cada etapa de esta travesía académica. A mis padres, por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo.

A Humberto Martínez Huerta, mi compañero de vida, gracias por tu amor incondicional, tu paciencia y tu fe en mí. Has sido mi refugio en los días difíciles y mi alegría en los momentos de logro. Eres también mi mentor en la vida y en lo académico. Gracias por contagiarme tu amor por el conocimiento y por la ciencia. Esta meta también es tuya.

A mis amistades más cercanas, gracias por los mensajes, las risas, los abrazos a la distancia y por recordarme quién soy cuando las dudas me hacían perder el rumbo.

A todos mis profesores de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, gracias por compartir sus conocimientos, su experiencia y su pasión por la disciplina. Sus enseñanzas han sido fundamentales para el desarrollo de esta tesis y para mi crecimiento como profesionista y como persona. Gracias por inspirarme a seguir aprendiendo, a mantener la curiosidad viva y a buscar siempre un impacto positivo desde la ciencia.

Agradezco a mis directoras de tesis, la Dra. Leticia Torres y la Dra. Edith Luévano, por su guía, paciencia y compromiso durante todo este proceso. Gracias por brindarme su confianza, por orientarme con sabiduría en los momentos clave y por exigirme siempre con el propósito de que alcanzara mi mejor versión académica y profesional. Cada observación, cada corrección y cada palabra de aliento han dejado huella no solo en este trabajo, sino también en mi formación como investigadora. Admiro profundamente su trayectoria y su pasión por la ciencia. Haber trabajado bajo su tutela ha sido un honor y una experiencia enriquecedora que llevaré conmigo siempre.

Esta tesis no solo es un resultado académico; es también testimonio del amor, la amistad, el apoyo y los logros personales que me han acompañado en el camino.

Dedicatoria

A la memoria de mi abuelito Héctor Javier Mellado Gutiérrez

1937-2025

Quien recientemente partió de este mundo, pero cuyo amor, sabiduría y ejemplo seguirán acompañándome toda la vida.

Gracias por ser un faro de ternura, paciencia y fortaleza. Por enseñarme, con tu vida, que la humildad y la bondad son formas de resistencia, y que el trabajo hecho con amor siempre da frutos. Tu voz, tus consejos y tus silencios sabios siguen resonando en mi corazón. En cada página de esta tesis, en cada paso que me acercó a esta meta, estuviste presente. Pensarte me dio fuerza cuando creí rendirme, y tu recuerdo se volvió impulso en los momentos más difíciles.

Sé que no pudo estar físicamente para ver este logro, pero confío en que, desde donde esté, celebra conmigo con esa sonrisa que lo caracterizaba .

Esta tesis es para él.

Con todo mi amor, gratitud y memoria.

Índice de Contenido

LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE ABREVIACIONES.....	xvi
Resumen del documento	xviii
RESUMEN	xix
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Veneno del aire: CO ₂	1
1.2 Biosorbentes para la captura de CO ₂	3
1.3 Algas pardas: Una alternativa promisorio para adsorber el CO ₂	6
1.4 Composición química de las algas pardas	8
1.5 Valorización de sargazo en la fabricación de biosoportes de catalizadores	9
1.6 Fotosíntesis artificial: Innovación en la producción de energía verde	10
1.7 Ácido Fórmico.....	13
1.8 Justificación.....	15
1.9 Hipótesis.....	17
1.10 Objetivos	17
1.10.1 Objetivo General.....	17
1.10.2. Objetivos particulares	17
CAPÍTULO 2	19
MÉTODO EXPERIMENTAL	19
2.1 Colecta, secado y molienda de las algas.	20
2.2 Fabricación de los biosoportes	20
2.3 Síntesis de Perovskitas de fórmula K ₃ Bi ₂ l ₉	22
2.3 Fabricación de sistemas híbridos: Biosoporte/fotocatalizador.....	22
2.4 Caracterización de los materiales	24
2.4.1 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	24
2.4.2 Difracción de rayos-X (DRX)	24
2.4.3 Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)	25

2.4.4 Análisis termogravimétrico (TGA)	25
2.4.5. Fisisorción de nitrógeno (método BET)	25
2.4.6. Ensayos de dureza	25
2.5 Evaluación de la actividad fotocatalítica de los sistemas híbridos en la foto CO ₂ RR..	26
2.6 Evaluación de la producción de ácido fórmico (HCOOH) mediante cromatografía de líquidos de alta resolución	27
CAPÍTULO 3	28
RESULTADOS	28
3.1. Caracterización de las algas pardas.....	28
3.1.1. Caracterización estructural de las algas pardas	28
3.1.2. Caracterización morfológica de las algas pardas	30
3.1.3. Caracterización óptica de las algas pardas.....	31
3.1.4. Caracterización textural de las algas pardas	32
3.1.5. Caracterización de grupos funcionales de las algas pardas	33
3.1.6. Caracterización termogravimétrica de las algas pardas.....	34
3.2 Biosoporte (MOC-alga)	36
3.2.1. Caracterización morfológica de biosoporte (MOC-alga).....	36
3.2.2. Caracterización textural de los biosoportes (MOC- Sg y Lp).....	38
3.2.3. Caracterización de grupos funcionales de los biosoportes (MOC-Sg y Lp)	39
3.2.4. Caracterización mecánica del biosoporte (MOC- Sg y Lp)	40
3.2.5. Hidratación y endurecimiento del biosoporte (MOC-Lp)	41
3.2.6. Dilatometría del biosoporte (MOC- Lp).....	42
3.3 Sistema híbrido: Biosoporte (MOC-alga)/KBI.....	45
3.3.1. Caracterización estructural del sistema híbrido (MOC-alga)/KBI	45
3.3.2. Caracterización óptica del sistema híbrido (MOC-alga/KBI).....	46
3.3.3 Resultados de la fotoreducción de CO ₂ del sistema híbrido (MOC-alga /KBI)	47
3.4 Sistema híbrido: Biosoporte (CLLp) /KBI	50
3.4.1. Caracterización estructural del Sistema híbrido (CLLp /KBI)	50
3.4.2. Caracterización morfológica del Sistema híbrido (CLLp /KBI)	51

3.4.3. Caracterización óptica del Sistema híbrido (CLLp) /KBI.....	52
3.4.4. Caracterización textural del Sistema híbrido (CLLp /KBI)	55
3.4.5. Caracterización de grupos funcionales del Sistema híbrido (CLLp /KBI)	57
3.4.7. Resultados de la fotoreducción de CO ₂ del Sistema híbrido (CLLp /KBI)	58
3.4.8 Mecanismo de reacción del Sistema híbrido (CLLp /KBI)	60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
PRODUCTOS GENERADOS Y DIFUSIÓN DEL CONOCIMIENTO	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS	66
ANEXOS.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencias de adsorción de CO ₂ de materiales convencionales [8,14,61].	4
Tabla 2. Reportes recientes sobre la captación de contaminantes con Sargazo.	8
Tabla 3. Composición de elementos (wt. %) de las algas <i>Sargassum</i> sp. (Sg) y <i>Lobophora</i> sp. (Lp).	29
Tabla 4. Propiedades textuales de las algas <i>Sargassum</i> sp. (Sg) y <i>Lobophora</i> sp. (Lp).	33
Tabla 5. Propiedades Texturales de los biosoportes con <i>Sargassum</i> sp. <i>Lobophora</i> sp.	38
Tabla 6. Propiedades textuales de la arcilla (CL), del biosporte (CLLp) y del sistema híbrido (CLLp/kbi).	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrategias para captura de CO ₂ [7,8].	2
Figura 2. Mapa de origen y distribución de <i>Sargassum</i> sp. [24].	6
Figura 3. Estructura química del alginato [29].	9
Figura 4. Mecanismo de reacción de la fotoreducción de CO ₂ en combustibles alternativos.	11
Figura 5. Fotocatalizadores para la producción de HCOOH a partir de la reducción de CO ₂ .	12
Figura 6. Estructura química del ácido fórmico [75].	13
Figura 7. Modelo de fotoreducción de CO ₂ del sistema híbrido.	16
Figura 8. Resumen del método experimental seguido en la presente investigación	19
Figura 9. Colecta de algas pardas	20
Figura 10. Fabricación de los sistemas híbridos: Biosoporte-fotocatalizador.	23
Figura 11. Fotografías de los diferentes soportes, biosoportes y sistemas híbridos fabricados en este proyecto	23
Figura 12. Esquema del sistema usado para la foto reducción de CO ₂ .	26
Figura 13. Difractograma de las algas <i>Sargassum</i> sp. (Sg) y <i>Lobophora</i> sp. (Lp).	30
Figura 14. Micrografía SEM de las algas (a,b) <i>Sargassum</i> sp. y (c,d) <i>Lobophora</i> sp.	31
Figura 15. Espectros de Absorción UV-Vis de <i>Sargassum</i> sp. (Sg) y <i>Lobophora</i> sp. (Lp).	32
Figura 16. Espectros de FTIR de <i>Sargassum</i> sp. (Sg) y <i>Lobophora</i> sp. (Lp).	34
Figura 17. Análisis TGA de las algas Sg y Lp.	35
Figura 18. Micrografías de la referencia a. y de los biosoporte: b. MOC-5%Sg, c. MOC-7%Sg, d. MOC-10%Sg, e. MOC-5%LP, f. MOC-7%Lp, y g. MOC-10%Lp.	37
Figura 19. Mapeo elemental del biosoporte MOC-7%Lp.	37
Figura 20. Espectros FTIR de los biosoportes: con diferentes porcentajes de alga: (a). <i>Sargassum</i> sp. y (b). <i>Lobophora</i> sp.	40
Figura 21. Resistencia a la compresión de muestras de MOC con diferentes porcentajes de masa de <i>Sargassum</i> sp. y <i>Lobophora</i> sp	41
Figura 22. Diagramas de Nyquist de la referencia MOC y con <i>Lobophora</i> sp. después de 4 h y 4 d. Se incluye una vista más cercana de los datos a frecuencias más altas.	42
Figura 23. Curvas de dilatometría del MOC con <i>Lobophora</i> sp.	44

Figura 24. Difractogramas de la comparación entre la fase cristalina MOC y MOC/KBI (a) y (b) al usar diferentes porcentajes de alga Lp.	46
Figura 25. Espectros de absorción de UV-Visible de los sistemas híbridos biosoporte (Sg)/KBI (a) y biosoporte (Lp) /KBI.	47
Figura 26. Comparación de la producción de HCOOH de los sistemas híbridos (con sargazo) y los soportes de referencia bajo irradiación visible durante la reacción de fotoreducción de CO ₂ por 5 horas.	48
Figura 27. Comparación de la producción de HCCOH y CH ₃ OH de los sistemas híbridos MOC-Sg%/KBI (a) y MOC-Lp%/KBI (b) bajo irradiación visible durante la reacción de fotoreducción de CO ₂ por 5 horas.	49
Figura 28. Difractogramas de la comparación entre la fase cristalina arcilla (CL), biosoporte (CLLP), biosoporte/KBI y biosoporte/KBI después de la fotoreducción de CO ₂	51
Figura 29. Micrografía de arcilla de referencia CL (a), CLLp (b), y del sistema CLLp-KBI (c-d).	52
Figura 30. Espectros de absorción de UV-Visible del soporte de referencia (CL), el biosoporte (CLLP) y el sistema híbrido (CLLP/KBI).	53
Figura 31. Espectro de fotoluminiscencia del soporte de referencia (CL), el biosoporte (CLLP) y el sistema híbrido (CLLP/KBI).	55
Figura 32. (a) Isotermas N ₂ y (b) distribución del tamaño de poro del soporte de referencia (CL), el biosoporte (CLLP) y el sistema híbrido (CLLP/KBI).	57
Figura 33. Espectro de FTIR de la referencia y del sistema híbrido.	58
Figura 34. (a) Producción de ácido fórmico en función del tiempo para los sistemas de referencia e híbrido y (b) Comparación de la producción de HCOOH en las diferentes muestras después de 5 horas de reacción bajo luz visible.	59
Figura 35. Producción de ácido acético y n-propanol como compuestos de alto valor añadido.	60
Figura 36. Mecanismo de fotoreducción de CO ₂ en el sistema híbrido (arcilla-Lp/KBI).	61

LISTA DE ABREVIACIONES

μm	Micrómetros
μmol	Micromoles
$\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$	Micromoles por gramo por hora
$\mu\text{mol/g}$	Micromoles por gramo
BC	Banda de conducción
BJH	Barrett-Joyner-Halenda
BV	Banda de valencia
CH_3OH	Metanol
CL	Clay
CLLp	Biosoporte Clay (arcilla) con alga Lp
cm^2	Centímetros cuadrados
CO_2	Dióxido de carbono
DRX	Difracción de rayos-X
e^-	Electrones
EDS	Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva
E_g	Band gap (Energía de banda prohibida)
eV	Electronvolts

G	Gramos
GP	Geopolímero
H	Horas
h ⁺	Huecos
H ⁺	Protones
H ₂	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
HCOOH	Ácido fórmico
Lp	<i>Lobophora</i> sp.
MOC	Oxicloruro de Magnesio
nm	Nanómetros
O ₂	Oxígeno
°C	grados Celsius
pH	Potencial de hidrógeno
SEM	Microscopía electrónica de barrido
Sg	<i>Sargassum</i> sp.
UV-Vis	Ultravioleta-visible
ZOC	Oxicloruro de Zinc

Resumen del documento

Alumna: Emireth Aitana Mellado Lira

Fecha de graduación: 8 de septiembre de 2025

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Síntesis de sistemas híbridos (biosoporte/catalizador) a partir del sargazo y su aplicación en la fotoreducción de CO₂

Número de páginas: 115

Candidata para obtener el grado de Maestra en Ciencias con orientación en
Ingeniería Ambiental

RESUMEN

Actualmente México presenta graves problemas ambientales asociados con la contaminación del aire causada principalmente por el uso indiscriminado y poco regulado de los combustibles fósiles. Estos combustibles no-renovables, al quemarse generan dióxido de Carbono (CO_2), un gas de efecto invernadero que impacta directamente en el cambio climático. Actualmente se busca la implementación de tecnologías alternas y sustentables que permitan la generación de fuentes de energía limpia y renovable para coadyuvar a mitigar el cambio climático. La fotoreducción de CO_2 representa una tecnología prometedora para este proceso que al implementarse coadyuvaría a reducir la concentración de gases de efecto de invernadero en la atmósfera y la generación de combustibles renovables usando luz solar como fuerza impulsora. Para este proceso se requiere el diseño y aplicación de materiales fotocatalizadores capaces de absorber energía solar y reducir el CO_2 . Para asegurar altas eficiencias en la fotoreducción de CO_2 , es necesario el diseño de materiales avanzados con propiedades específicas, tales como alta eficiencia de transferencia de cargas, ingeniería de bandas adecuadas para la formación de ciertos productos de reacción, alta área superficial, cristalinidad, alta absorción de luz, afinidad por el CO_2 , entre otras. Como alternativa, el uso de materiales con estructura perovskita de fórmula $\text{K}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ ha demostrado ser una opción altamente eficiente para la fotoreducción de CO_2 ; sin embargo, su aplicación se ve limitada por su baja estabilidad en ambientes acuosos, por lo que, esta investigación propuso el encapsulamiento de materiales $\text{K}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ en biosoportos, obtenidos a partir de residuos de biomasa, como una alternativa prometedora y sustentable para la adsorción y fotoreducción de CO_2 a condiciones ambientales. Estos materiales conforman sistemas híbridos, comprendidos como la combinación de un soporte inorgánico con biomasa (biosoporte) y con un fotocatalizador, cuyo diseño busca aprovechar simultáneamente la capacidad de adsorción del soporte, las propiedades naturales de la biomasa y la actividad catalítica de la perovskita. Particularmente, para el diseño de estos biosoportos se propuso el aprovechamiento de algas marinas invasoras en el Caribe mexicano, específicamente *Sargassum* sp. y *Lobophora* sp., como una alternativa ecológica para capturar

contaminantes específicos del ecosistema costero, que actualmente se está convirtiendo en un problema apremiante a nivel global, debido a su inusual proliferación cerca de las costas tropicales, ya que hoy en día la gestión de estas especies se hace únicamente transportándola y vertiéndola en vertederos locales, desperdiciando un potencial recurso valioso.

Los resultados de la presente investigación demuestran que los biosoportes con base en algas pardas son altamente prometedores para la adsorción y fotoconversión de CO_2 en productos de valor agregado (C1-C3). Se seleccionaron cuatro soportes inorgánicos basados en oxiclورو de Magnesio y Zinc, arcillas y geopolímeros. El producto principal fue ácido fórmico (HCOOH), alcanzando eficiencias superiores a $1500 \mu\text{mol h}^{-1}$ en el sistema híbrido de arcilla modificado con 5 % de algas pardas e impregnado con perovskita, bajo irradiación visible. Adicionalmente, se obtuvieron productos secundarios como ácido acético ($\sim 6.5 \mu\text{mol h}^{-1}$) y n-propanol ($\sim 1500 \mu\text{mol h}^{-1}$), evidenciando la capacidad del sistema para generar compuestos C2 y C3 que requieren mayor aporte de electrones. Los ensayos demostraron una estabilidad sostenida durante al menos 5 h de operación. Además, la incorporación de las algas pardas mejoró la absorción de luz gracias a la clorofila presente, que funcionó como un donador de electrones al sistema híbrido. Estos hallazgos confirman el papel clave de las algas como aditivo funcional en el diseño de sistemas híbridos sostenibles para la reducción de CO_2 .

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Veneno del aire: CO₂

La quema constante de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), la deforestación de bosques y la liberación de contaminantes de las industrias al medioambiente generan el aumento de liberación de CO₂ en la atmósfera, lo cual está provocando el efecto invernadero, la degradación de la capa de ozono y la acidificación de los océanos, entre otras afectaciones ambientales [1]. Dichas afectaciones aumentarán a medida que las necesidades energéticas continúen incrementándose, por lo que se prevé que su concentración siga al alza en los próximos años, tendencia que ya ha sido registrada [2]. Como referencia, mediciones realizadas por la NASA reportaron que en diciembre de 2024 la concentración de CO₂ en la atmósfera alcanzó 425 ppm, mientras que en 1958 era 317 ppm, lo que representa un aumento de 34% en poco más de medio siglo [3]. Para solucionar este problema, en los últimos años se han propuesto diferentes estrategias mediante la captura y conversión de CO₂ usando estrategias naturales como la reforestación, que permite que las plantas realicen la fotosíntesis. También, se ha propuesto la aplicación de la fotosíntesis artificial mediante la fotocatalisis heterogénea, la cual es una opción sustentable, económica e innovadora que consiste en la separación de las moléculas de H₂O y la reducción del CO₂ atmosférico [4]. Esta última tecnología requiere como primer paso la adsorción de CO₂, el cual se considera el paso limitante de este proceso. Algunas opciones innovadoras para la fijación de CO₂ usando estrategias naturales y tecnológicas se muestran en la **Figura 1**. Cada una de estas estrategias presenta diferentes eficiencias, por ejemplo, los bosques pueden absorben hasta 7,600 millones de toneladas métricas netas al año de CO₂, lo cual resalta la urgente necesidad de reforestación a nivel mundial [5]. Por otro lado, la captura directa de CO₂ en diferentes

fuentes fijas de emisión, también representa un método altamente prometedor que, al implementarse en escala masiva, coadyuvaría a evitar la acumulación excesiva de este gas en la atmósfera. Las eficiencias de esta tecnología pueden variar dependiendo de la naturaleza del proceso y la forma en que se lleva a cabo; por ejemplo, al usar solventes líquidos dependerá del tipo de solvente, concentración y pH, entre otros [6]. Por lo que, muchas de las investigaciones actuales se dirigen hacia el diseño de nuevos materiales sorbentes para la fijación selectiva de CO₂.

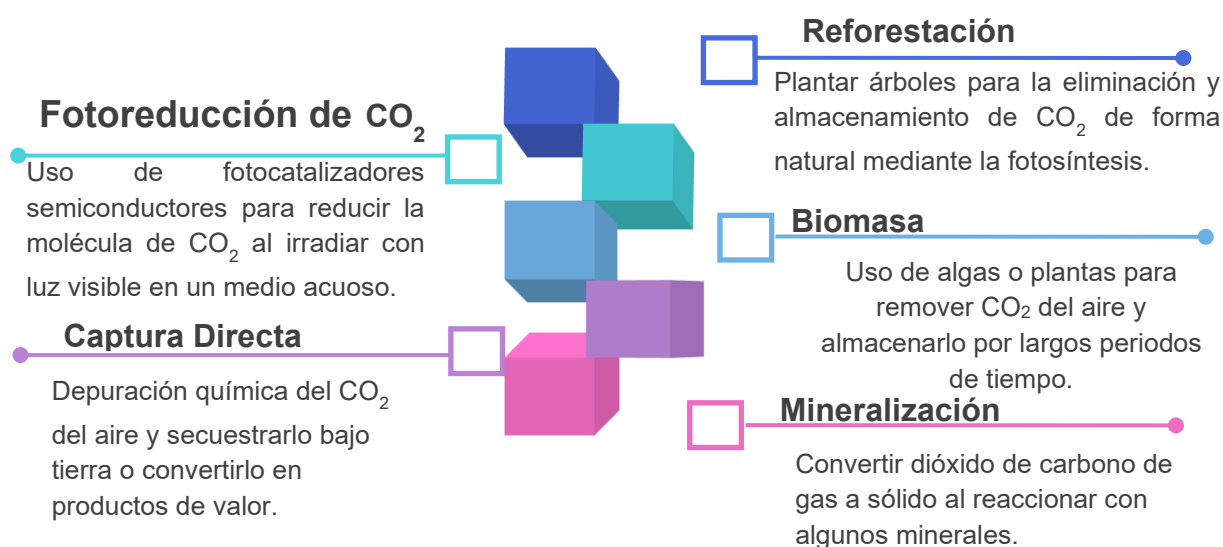


Figura 1. Estrategias para captura de CO₂ [7,8].

Algunos de los materiales que tradicionalmente se usan son: tamiz molecular de Carbono, utilizado principalmente para la adsorción de CO₂ y aunque se puede optimizar su capacidad de adsorción mejorar su rendimiento esto implica un alto costo económico. Por otra parte, los MOF (Metal Organic Frameworks) son ampliamente utilizados para la adsorción, separación y conversión de CO₂ en productos de alto valor como alcoholes, hidrocarburos y ácidos, sin embargo, se requiere de alta presión y baja temperatura para su síntesis. Las zeolitas son utilizadas como catalizadores y adsorbentes de CO₂, y aunque

presentan gran área superficial, reciclabilidad y estabilidad química y térmica, el costo de pre-tratamiento es muy elevado. Aunque el carbón activado se utiliza como adsorbente directo de CO₂, también es empelado como material de soporte o precursor de otros adsorbentes, sin embargo, para su síntesis se requiere de mucha energía y de procesos químicos contaminantes [9]. Como alternativa, el uso de biosorbentes representa una opción prometedora ya que se pueden fabricar a partir de residuos de biomasa, asequibles y de bajo costo, como se discutirá en las siguientes secciones.

1.2 Biosorbentes para la captura de CO₂

El fundamento del proceso de biosorción radica en la eliminación de contaminantes de diferentes medios empleando biomasa como sorbente [10]. Este proceso involucra dos fases, la fase sólida que es la biomasa (ej. algas pardas) y la fase líquida o gaseosa, la cual incluye la sustancia que se quiere adsorber o absorber [11]. Dentro de las ventajas que presenta la biosorción es que no precisa de nutrientes, no tiene limitaciones biológicas y, en comparación con los métodos tradicionales, permite mayores niveles de remoción de contaminantes [10]. Particularmente, en la fotosíntesis artificial se requiere que los materiales realicen un proceso de adsorción a temperatura ambiente, para poder fotoconvertir el CO₂ a otros productos de valor agregado, como se discutirá en las siguientes secciones. El éxito de la adsorción dependerá de la afinidad existente entre los grupos funcionales de la biomasa y el contaminante [11,12].

Los biosorbentes son materiales provenientes de biomasa residual capaces de adsorber directamente los contaminantes, los cuales pueden ser sometidos a tratamientos físicoquímicos sencillos para mejorar su eficiencia en los procesos que sean aplicados. Las características más importantes que debe tener un bioadsorbente son:

- Su estructura y composición química.
- Determinada rigidez y porosidad.

- Grupos funcionales y sitios activos que favorezcan la unión de enlaces con las especies de interés [11].
- Alta capacidad de adsorción.
- Selectividad.
- Estabilidad a largo plazo.
- Estar disponible localmente y ser de fácil acceso tanto físico como económico [10].

Algunos de los adsorbentes convencionales para la captura de CO₂ son las zeolitas, carbón activado, óxidos metálicos, polímeros porosos y sílice, una revisión más detallada de estos materiales se muestra en la Tabla 1 [13,8]. Como se observa, los óxidos metálicos presentan altas eficiencias (783 mg/g) para la adsorción de CO₂; no obstante, para lograr estos resultados se requieren altas temperaturas de operación (800 °C). A diferencia de estos materiales, los Metales Orgánicos Estructurados (MOFs) también presentan buenas eficiencias (396 mg/g) pero se requiere el enfriamiento de los gases hasta 0 °C, lo que representa un consumo energético adicional al proceso de captura de CO₂.

Tabla 1. Eficiencias de adsorción de CO₂ de materiales convencionales [8,14,61].

Material	Captura de CO ₂ (mg/g)	Temperatura (°C)	Presión (Bar)	Características
Zeolitas	207	60	1	Alta temperatura de regeneración. Alto costo de producción.
Carbón activado	237	25	1	Alta estabilidad térmica y química. Buena conductividad térmica. Bajo costo.
	6-485*	0-35	1	

Óxidos metálicos alcalinos	783	800	-	Bajo costo. Alta disponibilidad.
Silicatos	121	80	-	Gran área superficial. Volumen de poro elevado. Buena estabilidad mecánica.
Metales Orgánicos Estructurados (MOFs)	396	0	-	Buena estabilidad térmica.
Polímeros Porosos	137	-	-	Alta estabilidad química. Alta área superficial. Síntesis por diferentes rutas.
Arcillas	142	75	-	Bajo costo. Abundante disponibilidad
	3	25	50	Alta estabilidad química y mecánica.

*Obtenido a partir de fuentes naturales de biomasa (café, colillas de cigarro, cascara de nueces, cascara de coco).

No obstante, la mayoría de estos adsorbentes requieren procesos de síntesis complicados, así como el uso de reactivos contaminantes y de alto costo. Como alternativa, el uso de adsorbentes no convencionales y/o bioadsorbentes representa una opción prometedora para llevar a cabo la adsorción de CO₂, mimetizando la fotosíntesis natural. Hasta el momento, se ha propuesto una gran cantidad de residuos de biomasa como materia prima para fabricar bioadsorbentes de CO₂, para obtener carbón activado, con eficiencias prometedoras [15]. Otras fuentes de biomasa pueden ser: desechos de frutas, residuos agrícolas, hongos, algas, bacterias y quitosano [16-20]. Entre ellos, las algas pardas como el sargazo representan un potencial precursor de bioadsorbentes de CO₂ debido a su composición química rica en alginatos (C₆H₇NaO₆)_n que son altamente afines a moléculas ácidas como el CO₂ y, además de que es un recurso natural que está altamente disponible en México [16].

1.3 Algas pardas: Una alternativa promisoría para adsorber el CO₂

Las algas pardas pertenecen a la clase Phaeophyceae, la morfología de sus diferentes especies es variada, pero en todos los casos los pigmentos fotosintéticos que las componen son: clorofilas a, c1 y c3, fucoxantina, con paredes celulares compuestas por una combinación de alginatos, fucanos sulfatados y celulosa. [21]. Al Caribe mexicano arriban 123 especies de algas pardas, tales como: *Dictyota cervicornis*, *Lobophora variegata*, *Padina gymnospora*, *Levringia brasiliensis*, *Ectocarpus rallsiae*, *Turbinaria turbinata* y gran cantidad de especies del género *Sargassum* [22]. Entre ellos, el sargazo es una macroalga parda perteneciente a la clase Phaeophyceae (algas pardas), familia Sargassaceae, género *Sargassum*, que incluye más de 300 especies tanto bentónicas como holopelágicas, estas últimas se agrupan para formar extensas masas flotantes en la superficie del mar denominadas tapetes o parches [23]. Dichas algas provienen del Mar de los Sargazos, que está en el Atlántico Norte y se desplazan a las costas de nuestro país por las corrientes marinas, como se muestra en la **Figura 2**.

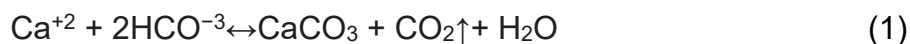


Figura 2. Mapa de origen y distribución de *Sargassum* sp. [24].

Su crecimiento acelerado se debe principalmente a la absorción de nutrientes y materia orgánica proveniente de la desembocadura de ríos y el aumento de las temperaturas del océano [25]. Desde el 2011 se ha presentado el arribo masivo de estas macroalgas holopelágicas en las costas del mar Caribe mexicano, ocasionado problemas ambientales

afectando sinérgicamente al sector turístico, económico y de salud [23]. La llegada desmedida de estas algas ha formado el llamado “Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico” con una biomasa aproximada de 2,360 m³ por kilómetro de playa al mes durante 2015 y un aproximado de 200,000 toneladas al año desde entonces [26]. Asimismo, su descomposición puede afectar a la salud y al ambiente mediante la emisión de gases de efecto invernadero como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S) y arsénico (As) [27]. Debido al problema que ha generado el exceso de sargazo en las costas del Caribe mexicano se han explorado diversas alternativas para su aprovechamiento como alimento para ganado, producción de fármacos [28], sustrato agrícola [29,30], así como para remover metales pesados en el tratamiento de aguas residuales [29,31].

Una alternativa prometedora para el aprovechamiento de sargazo es su uso como bioadsorbente de CO₂, debido a sus grupos funcionales que albergan sitios activos que permiten la adsorción del gas. Uno de estos grupos es el ácido sulfónico (R-S(=O)₂-OH, donde R es una cadena hidrocarbonada) [32], derivado de los grupos amino, ácidos carboxílicos e hidroxilos del ácido algínico. De acuerdo con la bibliografía, las algas pardas capturan CO₂ principalmente por fotosíntesis y mediante la macrofauna asociada que fija Carbono en sus conchas y produce carbonato cálcico. Este proceso de calcificación se desencadena por la solubilidad del CO₂ atmosférico en agua de mar, que genera iones carbonato y bicarbonato, utilizados por las algas en su proceso de calcificación, como se muestra en la **Ecuación 1** [33]:



Otra de las algas pardas que recientemente (inicios del 2024) se ha identificado en el Caribe mexicano es *Lobophora sp.* Su origen y distribución hasta el momento son desconocidos y, actualmente es objeto de estudio del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México; no obstante, su composición exacta, así como su interacción con el CO₂ no ha sido reportada hasta el momento. La capacidad de adsorción del sargazo de distintos contaminantes se resume en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Reportes recientes sobre la captación de contaminantes con Sargazo.

Contaminante	Capacidad de adsorción (mg g ⁻¹)	Ref.
Fe ³⁺	19.86-24.78	[34, 335]
Hg ²⁺	30.86-147.05	[36, 37]
Cr ⁶⁺	33.25-196.10	[38, 39]
Co ²⁺	3.12-80.27	[40, 41]
Cd ²⁺	157.80	[42]
Cu ²⁺	77.40	[42]
Zn ²⁺	118.50	[42]
Pb ²⁺	55.56-367.94	[43, 44]
Ni ²⁺	81.20	[45]
Mn ²⁺	99.97	[46]
Colorantes aniónicos ¹	46.12	[47]
Colorante catiónicos ²	27.19-279.00	[48-50]
Ag ⁺	0.31	[51]
CO ₂	0.05-92.01	[52-54]

¹ Amarillo sunset, Amarillo eosin e indigo carimin. ² Azul de metileno, verde de malaquita y negro ácido.

1.4 Composición química de las algas pardas

La composición química de *Sargassum* sp. es homogénea con presencia en su mayoría de sales de ácido algínico presentes en la pared celular y de las zonas intercelulares de las algas pardas [55]. Naturalmente forman iones Ca⁺², Na⁺, Mg⁺², Sr⁺² y Ba⁺². Su función principal es proporcionar fuerza y flexibilidad a los tejidos de las algas. Es considerado también un polímero de ácido β-D-manurónico y ácido α-L-gulurónico, unidos por enlaces glucosídicos (1-4), agrupados en tres tipos de segmentos: D-manurónico (M), L-gulurónico (G) y un segmento de diadas con ambos ácidos alternados (MM, GG, MG) [56].

El alginato se encuentra en forma de gel en la pared celular de *Sargassum* sp., el cual es altamente afin a cationes metálicos [57], lo que le confiere una alta capacidad de sorción de metales pesados tales como: As, Ca, Cl, K, Mn, P, Rb, S, Si, Sr, Th, U y en menor

frecuencia Mg y Al, lo que representa un serio riesgo para el medio ambiente y al ser humano [58]. La fórmula química del alginato se representa en la **Figura 3**.

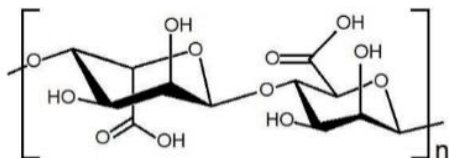


Figura 3. Estructura química del alginato [29].

1.5 Valorización de sargazo en la fabricación de biosoportes de catalizadores

Recientemente se ha explorado el uso de materiales inorgánicos, de bajo costo y sustentables, como soportes de materia orgánica (sargazo) para procesos de descontaminación ambiental, Bilba y colaboradores demostraron que las cenizas del sargazo tienen propiedades puzolánicas [59], lo que abrió posibilidades en materiales cementantes de origen sustentable. Además, las algas en materiales cementantes disminuyen la permeabilidad a agentes agresivos, mejorando la sostenibilidad y durabilidad. Algas como *Sargassum sp.* se han utilizado como aditivos para materiales alternativos. La adición de hasta un 3 %wt. de algas mejora la plasticidad, propiedades higroscópicas, flexibilidad y aislamiento térmico, aunque disminuye la resistencia a la compresión y al vapor de agua [60-62].

El origen del aprovechamiento de estas algas se debe a que los cementantes alternativos generalmente están cargados negativamente, lo que da lugar a un grupo catiónico y aniónico intercambiable a través de un mecanismo de reticulación, donde la presencia de iones Ca^{2+} podría ayudar a crear puentes electrostáticos entre ambos grupos [63]. Adicionalmente, estos cementantes también pueden actuar como encapsulantes de

nanopartículas de materiales fotocatalizadores. Por mencionar un ejemplo, un trabajo previo de este grupo de investigación demostró que geopolímeros, cemento de Magnesio y el concreto aereado encapsularon eficientemente materiales fotocatalizadores con estructura tipo perovskita de fórmula $A_3Bi_2I_9$ ($A=Cs, K$). Lo que favoreció la adsorción de CO_2 , la fotoreducción de CO_2 y la producción altamente estable de $HCOOH$ ($>250\text{mol h}^{-1}$). Por tal motivo, esta investigación busca diseñar alternativas más sostenibles y eficientes mediante el aprovechamiento de biomasa para la fabricación de materiales inorgánicos que actuarán como biosoportres de fotocatalizadores para ser usados en la reducción de CO_2 . [64].

1.6 Fotosíntesis artificial: Innovación en la producción de energía verde

La fotosíntesis artificial es un sistema innovador basado en la imitación de la naturaleza utilizado para la producción de combustibles alternativos para la generación de energía verde mediante la fotoreducción de CO_2 (CO_2RR) [65]. La tecnología CO_2RR permite la conversión del gas de efecto invernadero CO_2 en una variedad de combustibles renovables de cadena corta, tales como ácido fórmico ($HCOOH$) y de ahí se producen reacciones subsecuentes para la producción de monóxido de carbono (CO), formaldehído ($HCOH$), metanol (CH_3OH), metano (CH_4), etanol (CH_3CH_2OH), entre otros, [66, 67]. Tal como se ilustra en la **Figura 4**, al irradiar luz sobre el catalizador semiconductor, se generan pares electrón-hueco, los cuales participarán en las reacciones de reducción y oxidación del CO_2 , respectivamente. Finalmente, se obtienen productos que pueden ser considerados como combustibles renovables [68].

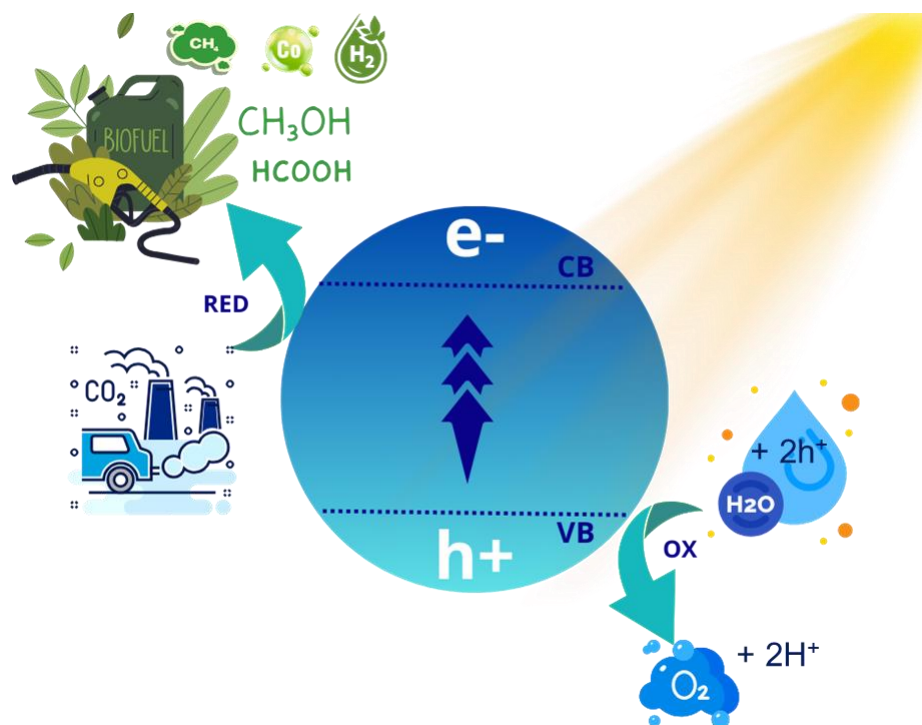


Figura 4. Mecanismo de reacción de la fotoreducción de CO_2 en combustibles alternativos.

La eficiencia del proceso de conversión del gas se verá afectada por un gran número de factores; por ejemplo: la morfología del material, la separación de cargas y la capacidad de adsorción, entre otros. No obstante, la selección del fotocatalizador es un paso crítico para asegurar altas eficiencias en el proceso CO_2RR [64, 66]. En los últimos años se han estudiado diferentes fotocatalizadores pertenecientes al grupo de los óxidos, tales como: óxidos simples (TiO_2), óxidos binarios y ternarios (por ejemplo, NaFeTiO_4), materiales con estructura tipo perovskita con haluros ($\text{A}_3\text{Bi}_2\text{X}_9$, $\text{A}=\text{Cs}$, K y $\text{X}=\text{I}, \text{Br}, \text{Cl}$) y perovskitas de óxidos (por ejemplo, CaTiO_3) [64, 67, 69]. Los fotocatalizadores de haluro de Bismuto (libres de plomo) con estructura perovskita son uno de los mejores candidatos para llevar a cabo este proceso debido a su alta absorción óptica, alta movilidad, larga longitudes de difusión y transporte ambipolar de cargas [70]. De acuerdo con el análisis realizado que se muestra

en la **Figura 5**, las perovskitas de haluro de Bismuto ($A_3Bi_2X_9$) representan a los materiales más prometedores para la producción de HCOOH a partir del proceso CO_2RR hasta el momento. Sin embargo, aún existen retos a vencer en la aplicación de estos materiales relacionado con su estabilidad en medios acuosos. Previamente, se demostró la alta actividad fotocatalítica en la reacción CO_2RR de las perovskitas de fórmula $Cs_3Bi_2I_9$, alcanzando una eficiencia de conversión de energía de 15.7%. Además, se evidenció que, al inmovilizar este material en soportes porosos se favoreció su estabilidad durante largos tiempos de reacción (>16 h) [64]. Por lo que, esta investigación se centra en la combinación de algas pardas y soportes inorgánicos para desarrollar biosoportes para la inmovilización de fotocatalizadores con estructura tipo perovskita, con el fin de favorecer su estabilidad y adsorción de CO_2 para la producción de combustibles renovables como el monóxido de Carbono (CO), el formaldehído (CH_2O), el metanol (CH_3OH), el metano (CH_4) y el ácido fórmico (HCOOH), reduciendo así las concentraciones atmosféricas de CO_2 contribuyendo así a la lucha contra el cambio climático mediante soluciones sostenibles e innovadoras [71, 72]. Siendo el HCOOH el que mayor actividad de reducción de CO_2 presenta debido a la gran carga negativa del hidrogeno adsorbido en la superficie [73].

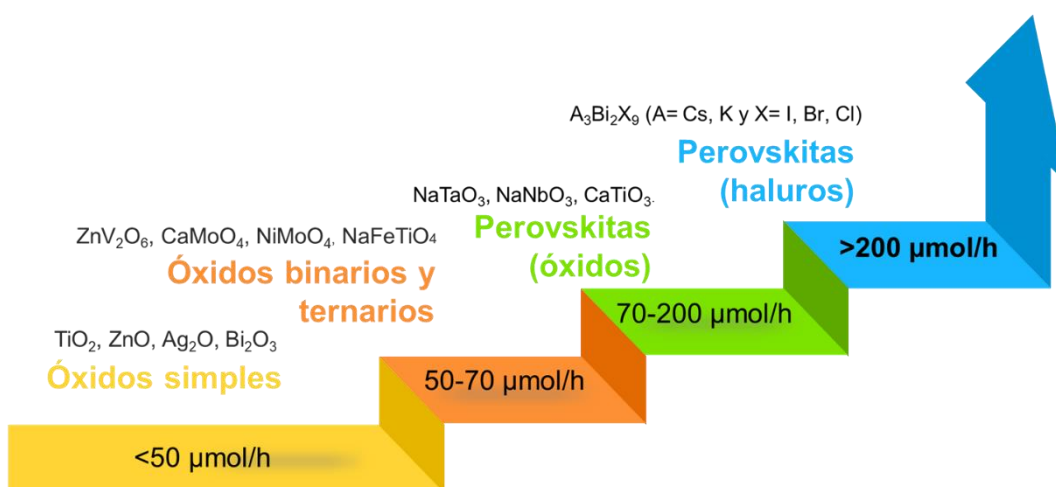


Figura 5. Fotocatalizadores para la producción de HCOOH a partir de la reducción de CO_2 [64-69,74-76].

1.7 Ácido Fórmico

El ácido fórmico, producido naturalmente por plantas, bacterias e insectos, es un ácido orgánico fuerte carboxílico con características que le permite ser biodegradable y en consecuencia ambientalmente amigable [77,78]. Si se dispersa en el medio ambiente (agua, suelo o aire) se espera que tenga una vida media corta, que no se bioacumule y que reaccione con radicales hidroxilos contenidos en el vapor de agua [78]. La estructura química del HCOOH se muestra en la **Figura 6**.

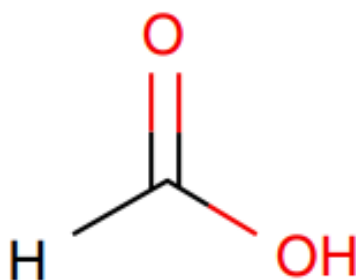
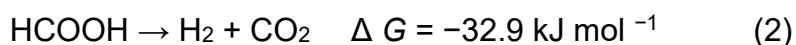


Figura 6. Estructura química del ácido fórmico [78].

Actualmente, la producción tradicional de este ácido se hace mediante un método basado en combustibles fósiles que consta de dos pasos, en primer lugar, se hace reaccionar el metanol con CO para la generación de formiato de metilo para posteriormente hidrolizarlo y formar ácido fórmico [79]. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que puede ser obtenido mediante fotocatalisis heterogénea a partir de la fotoreducción de CO₂ [79,80,71]. Por si solo se ha propuesto como combustible renovable pero además es una de las moléculas precursoras para la generación de H₂ [58], debido a que posee una capacidad volumétrica de ~53,4 g/L, lo que equivale a 4.4 wt% de hidrógeno y es posible descomponerlo mediante la vía representada en la **Ecuación 2** [79]:



Producir ácido fórmico a partir del CO_2 atmosférico puede ayudar a reducir el calentamiento global, ya que la combinación de CO_2 y HCOOH podría actuar como un sistema simple en dónde ocurre la descomposición semi selectiva del ácido fórmico a H_2 y CO_2 , lo que genera que el CO_2 sea también un portador de Hidrógeno [82].

1.8 Justificación

Las costas del Caribe mexicano se encuentran sometidas desde el 2011 a una gran plaga de algas marinas pardas entre las que se encuentra el Sargazo, las cuales arriban en grandes cantidades provocando saturación a lo largo de la línea de costa, lo que provoca afectaciones ambientales y económicas debido a que se ha convertido en un desecho natural que no cuenta con un programa de manejo integral. Por ello, recientemente se ha explorado su aprovechamiento en diferentes aplicaciones, entre las que destaca su uso como adsorbente de metales pesados y recientemente de CO₂. Esta aplicación puede ser aprovechada para el diseño y fabricación de biosoportos selectivos para capturar CO₂ en procesos de fotosíntesis artificial. Una vez adsorbido en la superficie de los soportes, el CO₂ puede ser convertido a combustibles alternos como el ácido fórmico, metanol, metano y gas de síntesis, usando materiales fotocatalizadores en el proceso de fotosíntesis artificial, el cual es un método sustentable, de bajo costo y con gran relevancia científica y tecnológica que, al ser implementado coadyuvaría a reducir la crisis energética que enfrentamos de manera global. En resumen, esta investigación busca proponer soluciones innovadoras para la implementación de técnicas de adsorción/reducción de CO₂ que, en conjunto con el aprovechamiento de algas pardas, permita la obtención de sistemas de materiales híbridos para coadyuvar a mitigar los efectos de los diferentes tipos de contaminación ambiental y el cambio climático asociado con la quema excesiva de combustibles fósiles. Una representación del modelo de fotoreducción de CO₂ con el sistema híbrido propuesto se muestra en la **Figura 7**. Este proceso inicia con la captura del CO₂ sobre la superficie del biosoporte formado por compuestos inorgánicos y biomasa (algas pardas), el cual una vez adsorbido será fotoconvertido mediante el uso de materiales con estructura tipo perovskita (fotocatalizador), destacando la interacción de la luz como fuente de energía para la transformación química.

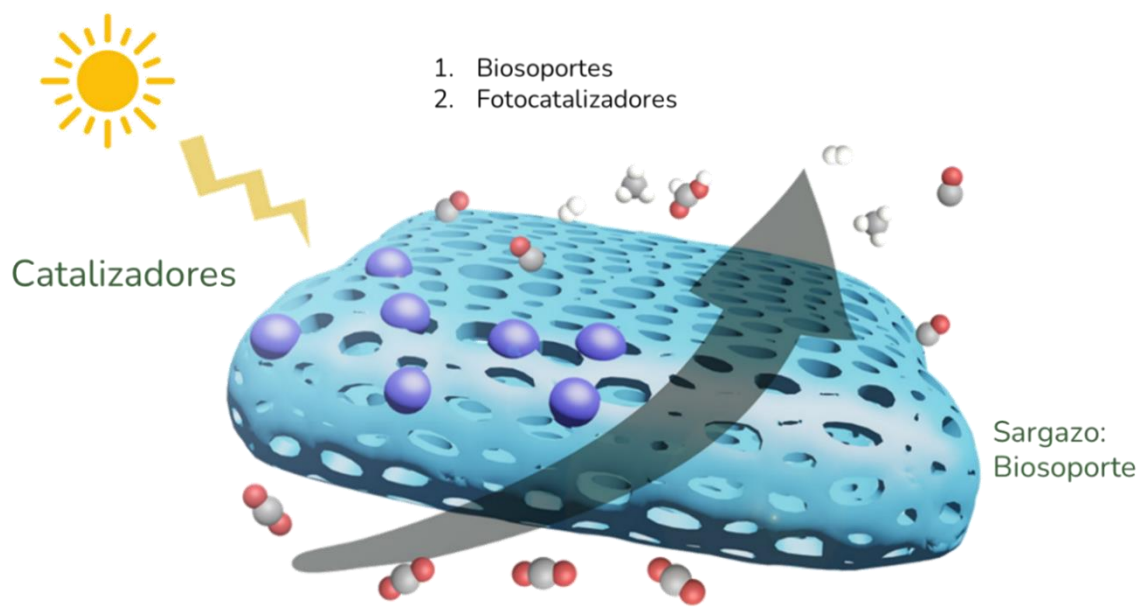


Figura 7. Modelo de fotoreducción de CO₂ del sistema híbrido.

1.9 Hipótesis

El uso de sistemas híbridos: $K_3Bi_2I_9$ /biosoporte favorecerá altas eficiencias en la fotoreducción de CO_2 a combustibles renovables, debido a una absorción de luz mejorada y a una mayor adsorción de CO_2 , por el alto contenido de alginatos en la pared celular de las algas pardas. Además, el biosoporte proporcionará una mayor estabilidad a las perovskitas, permitiendo mayores eficiencias durante largos tiempos de operación (>12h).

1.10 Objetivos

1.10.1 Objetivo General

Obtener sistemas híbridos biosoporte/fotocatalizador a partir del aprovechamiento de *Sargassum sp.* y *Lobophora sp.*, en conjunto con fotocatalizadores con estructura tipo perovskita $K_3Bi_2I_9$, como estrategia de mitigación de contaminación atmosférica para la captura y fotoreducción de CO_2 para la generación de combustibles renovables.

1.10.2. Objetivos particulares

- Colectar muestras de algas pardas en costas del Caribe mexicano.
- Caracterizar las algas pardas colectadas por las técnicas difracción de rayos-X (DRX), fluorescencia de rayos-X (FRX), espectroscopía de infrarrojo (FTIR), espectroscopía Raman, microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis elementales (EDS), fisisorción de nitrógeno (método BET) y termogravimetría (TGA/DTA).
- Fabricar biosoportos usando materiales cerámicos.
- Evaluar la capacidad de adsorción de CO_2 de los biosoportos.
- Sintetizar perovskitas de fórmula $K_3Bi_2I_9$.
- Acoplamiento de los sistemas híbridos: perovskita/ biosoporte
- Caracterizar los sistemas híbridos (perovskita/ biosoporte) mediante las técnicas: DRX, SEM/EDS, FTIR, UV-VIS y Fisisorción de nitrógeno.

- Evaluar la actividad fotocatalítica en la reducción de CO₂ de los sistemas híbridos sintetizados para la generación de combustibles renovables.

CAPÍTULO 2

MÉTODO EXPERIMENTAL

El método desarrollado en esta investigación se enfocó en la recolección, tratamiento y aplicación de algas pardas en la fabricación de sistemas híbridos con propiedades fotocatalíticas, para lo cual se diseñaron y fabricaron soportes cerámicos de diferentes materiales, incluyendo oxiclورو de Magnesio (MOC), oxiclورو de Zinc (ZOC), arcilla (CL) y geopolímeros (GP); dichos soportes fueron mezclados con el polvo de algas en distintas concentraciones y se impregnaron con una tinta precursora de perovskita $K_3Bi_2I_9$. Para evaluar la composición y las propiedades de los materiales obtenidos, se aplicaron técnicas de caracterización avanzada, incluyendo microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX), espectroscopia FTIR, análisis termogravimétrico (TGA), fisisorción de Nitrógeno (BET) y ensayos de dureza. Finalmente, la actividad fotocatalítica de los sistemas híbridos se evaluó en un reactor de flujo continuo. En resumen, el método se evaluó en 3 fases, que se esquematizan en el diagrama de la **Figura 8**.

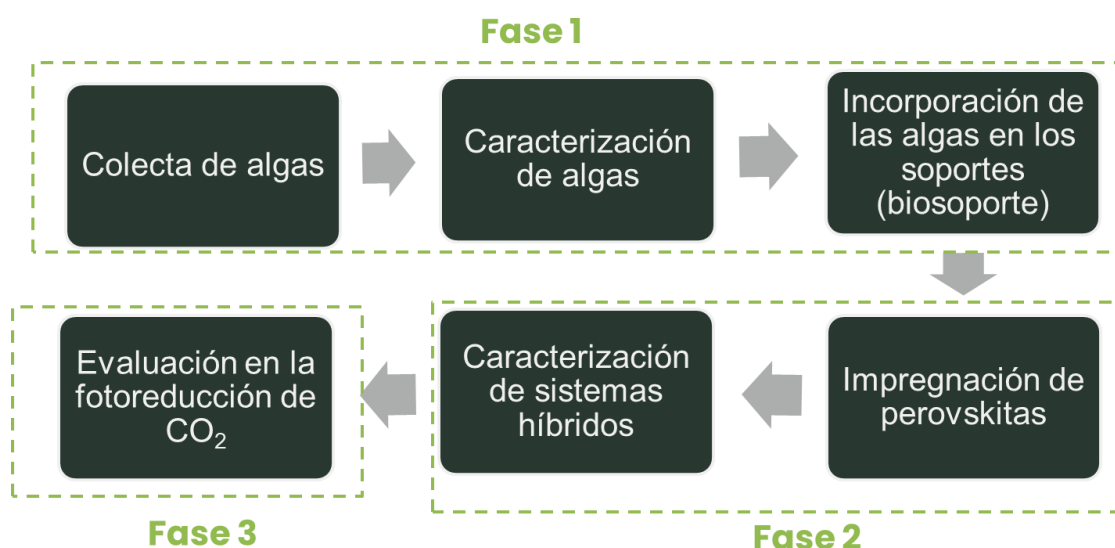


Figura 8. Resumen del método experimental seguido en la presente investigación.

2.1 Colecta, secado y molienda de las algas.

Se realizó un primer muestreo de algas pardas del género *Sargassum* sp. (Sg), colectado en Cancún, Quintana Roo, México en agosto de 2023 a pie de playa con coordenadas 21°05'16.3"N 86°46'09.3"W. Durante un segundo muestreo se colectaron algas pardas del género *Lobophora* sp. (Lp) en Cozumel, Quintana Roo, México en enero de 2024 a pie de playa con coordenadas 20°40' 28,3"N 87°01'47.1"W. La evidencia de las colectas se muestra en la **Figura 9**. Se lavaron las algas con agua corriente, posteriormente se dejó secar a temperatura ambiente durante 48 h, y a continuación se secaron en horno Binder a 60°C durante 12h. Una vez secas, se molieron manualmente en mortero y después se pulverizaron en un molino de bolas Fritsch pulverisette 7 durante 10 min a 500 rpm para la obtención de polvo fino de las algas. Cabe destacar que ambas algas fueron etiquetadas como Sg y Lp respectivamente.

Batch 1- Identificación: Sg.

Batch 2 - Identificación: Lp.



Figura 9. Colecta de algas pardas.

2.2 Fabricación de los biosoportes

Una estrategia innovadora y sostenible es el encapsulamiento de fotocatalizadores y la compactación de algas en materiales porosos de naturaleza inorgánica, debido a su bajo costo y resistencia a la oxidación, humedad, presión y altas temperaturas. Por este motivo,

en la presente investigación se propuso la fabricación de cuatro tipos diferentes de soportes: cementos de oxiclورو de Magnesio (MOC) y oxiclورو de Zinc (ZOC), además de arcilla (CL) y geopolímeros (GP). En el capítulo 3 se presentarán y discutirán los resultados de los sistemas fabricados con MOC y CL; mientras que los resultados de ZOC y GP se presentarán en el **Anexo 1**.

A) Oxiclورو de Magnesio y Zinc

Los soportes de MOC se fabricaron añadiendo óxido de Magnesio (MgO, Sigma Aldrich, 95%) y clورو de Magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ DEQ, 99%) y agua siguiendo la relación MgO/H₂O previamente reportada por Rodríguez- Alfaro y colaboradores [83]. Por otro lado, para la fabricación del ZOC se mezcló óxido de Zinc (ZnO, DEQ, 99%) y clورو de Zinc (ZnCl_2 , Fermont PA Cert, 99%), siguiendo la relación estequiométrica ZnO:ZnCl₂:H₂O de 4:1:5 previamente reportada en el grupo de investigación [84].

B) Arcillas

Por otra parte, los soportes de acilla fueron realizados mezclando arcilla blanca (DAS-air dry) y agua en una proporción en masa 5:1.

C) Geopolímeros

Finalmente, los soportes de geopolímeros se realizaron agregando metacaolín, ceniza volante, escoria, metasilicato de Sodio (Na_2SiO_3), hidróxido de Sodio (NaOH) y agua en proporción 6:6:8:4:2.

Los soportes mencionados fueron mezclados de manera individual con algas pardas previamente molidas en tres concentraciones diferentes (5, 7 y 10 %wt) mediante agitación constante. Las mezclas se vaciaron en moldes de 7 cm² y se dejaron secar a temperatura

ambiente durante 7 días (MOC, ZOC, GP) y 1 día (arcilla). El resultado de este proceso es lo que denominamos biosoporte.

2.3 Síntesis de Perovskitas de fórmula $K_3Bi_2I_9$

Para la síntesis de la tinta de perovskita KBI se preparó una solución estequiométrica de KI (DEQ, 99%) y BiI_3 (Aldrich, 99%) en una mezcla de solventes N, N-dimetilformamida (DMF, Aldrich, 99%) y dimetilsulfóxido (DMSO, Aldrich, 99%). El BiI_3 se añadió inmediatamente tras la introducción de KI, dada su naturaleza higroscópica. Posteriormente, se mezcló manualmente con una espátula para eliminar grumos y se introdujo a baño de ultrasonido. A continuación, la tinta se agitó magnéticamente durante un período de 2 h y dejó enfriar a temperatura ambiente antes de someterla a filtración con una jeringa de PTFE con un tamaño de poro de 0.2 mm. Finalmente se obtuvo una solución color rojo claro que se almacenó en un frasco de vidrio ámbar para evitar el contacto con la luz [64].

2.3 Fabricación de sistemas híbridos: Biosoporte/fotocatalizador

Para la fabricación de los sistemas híbridos fue necesario el diseño y manufactura de soportes cerámicos (porosos), en combinación con las algas pardas, como se describió anteriormente, los cuales fueron impregnados con 50 μ L de tinta precursora de perovskita $K_3Bi_2I_9$, posteriormente se dejaron secar a 80 °C durante 6 horas, dando lugar a los sistemas híbridos. El método general utilizado se describe en las siguientes secciones y se resume en la **Figura 10**. Y el resumen de los soportes, biosoportes y sistemas híbridos se exhibe en la **Figura 11**.

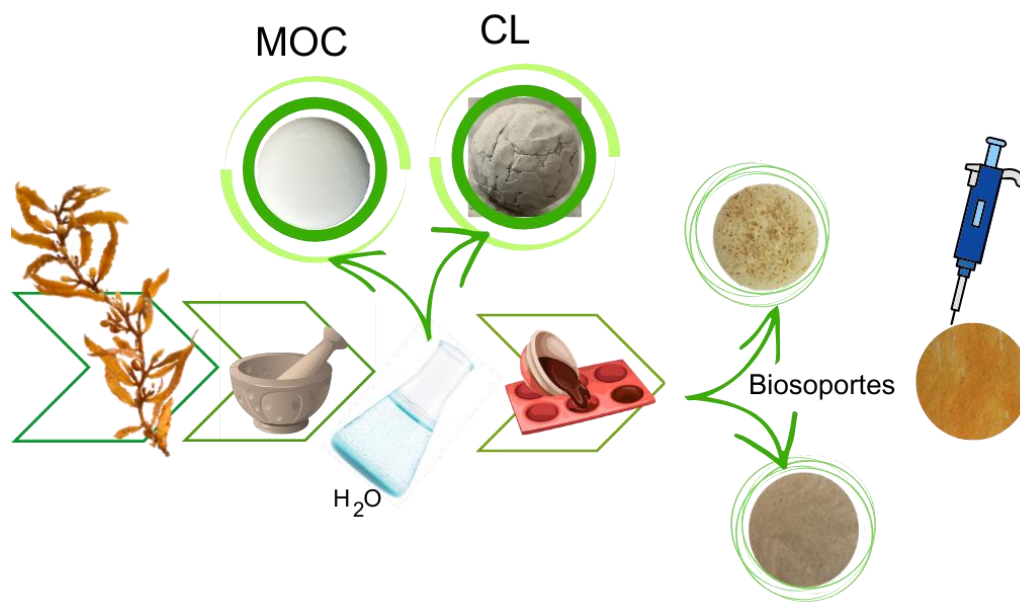


Figura 10. Fabricación de los sistemas híbridos: Biosoporte-fotocatalizador.

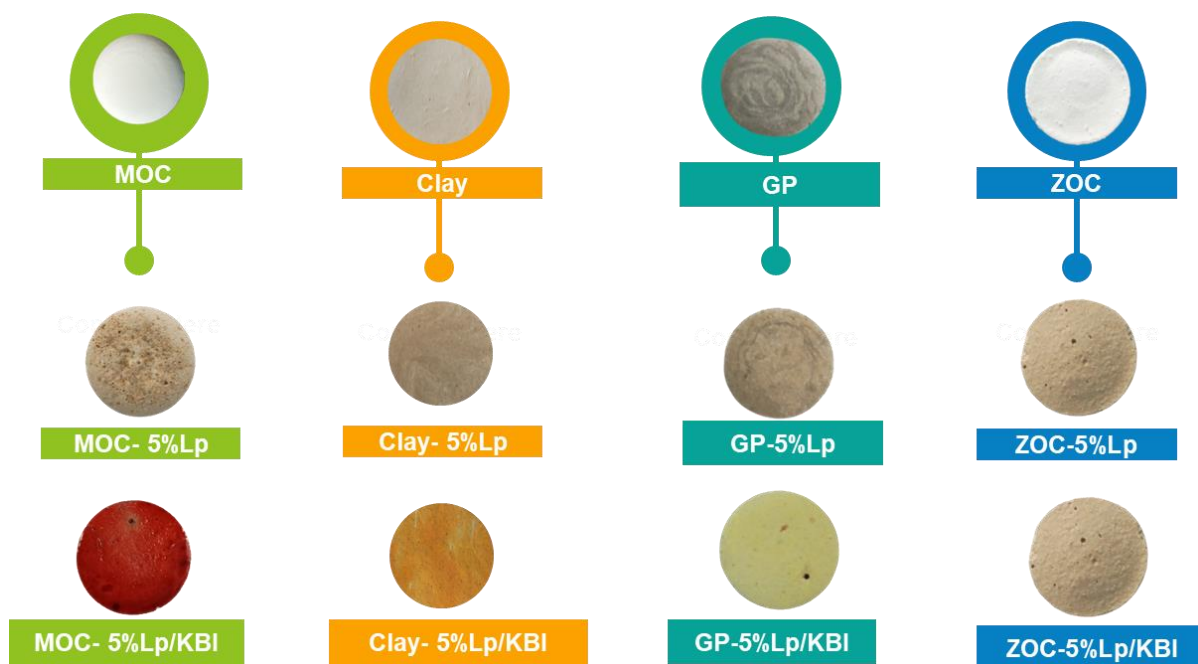


Figura 11. Fotografías de los diferentes soportes, biosoportes y sistemas híbridos fabricados en este proyecto.

2.4 Caracterización de los materiales

Para conocer las características morfológicas, composición química, propiedades ópticas, mecánicas y térmicas de las algas y los sistemas híbridos fabricados se emplearon diversas técnicas de caracterización descritas a continuación.

2.4.1 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Mediante esta técnica se observó la superficie de las algas pardas Sg y Lp, así como los sistemas híbridos en un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6490LV, equipado con un detector de energía dispersiva (EDS) Oxford, a una distancia electrodo-muestra de 10mm y un spot size de 37 en un microscopio electrónico de barrido de Emisión de Campo Modelo Nova NanoSEM 200 Marca FEI. Las muestras se soportaron sobre una banda de Cobre y se recubrieron con una aleación de Oro-paladio en una recubridora Dalton Vacuum Desk IV.

2.4.2 Difracción de rayos-X (DRX)

Esta técnica permitió caracterizar la estructura del material mediante un difractómetro Malvern Panalytical Modelo Empyrean dy1681, con radiación de Cu K α (40 kV, 30 mA) con una longitud de onda de $\lambda=1.5405$ Å. Los intervalos de medición fueron de 2θ de 5° a 70°, a través de un tamaño de paso de 0.02° y a un tiempo de 0.3 s por cada paso, soportado la muestra en un porta muestras de acero acrílico.

2.4.3 Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica fue utilizada para identificar los grupos funcionales presentes en las algas y en los sistemas híbridos, utilizando un espectrómetro Nicolet iS 50 FT-IR con un rango de intervalo de 600 a 4000 cm^{-1} en modo de transmitancia.

2.4.4 Análisis termogravimétrico (TGA)

Este análisis se llevó a cabo mediante el equipo STA PT 1600, bajo condiciones de atmosfera de aire ambiental estático y una velocidad de calentamiento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$. El cual permitió conocer el porcentaje de la perdida en peso de las algas por deshidratación y conocer qué tan estable es el material al someterla a variaciones de temperatura.

2.4.5. Fisisorción de nitrógeno (método BET)

Con esta técnica se determinaron las propiedades texturales de las algas y de los biosoportes como: área superficial, volumen y radio del poro. El equipo utilizado fue un NOVA 2000e Quantachrome Instruments. La muestra fue desgasificada a 60°C a vacío, durante 2 h. A continuación, se efectuaron las isotermas de adsorción-desorción de N_2 a -196°C .

2.4.6. Ensayos de dureza

Esta técnica permite evaluar las propiedades mecánicas de la superficie de un material mediante el registro continuo y de alta resolución tanto de la carga como del desplazamiento que experimenta el nanoindentador al penetrar dicha superficie. Los biosoportes se midieron utilizando un nanoindentador Fischerscope HM2000–5, equipado

con un penetrador Vickers de diamante de base cuadrada y forma piramidal. Se aplicó una fuerza de 50 mN sobre el penetrador durante 60 s, sin tiempo de fluencia, en la superficie de cada muestra de los soportes.

2.5 Evaluación de la actividad fotocatalítica de los sistemas híbridos en la foto CO₂RR

La evaluación de los sistemas fabricados en la fotoreducción de CO₂ se realizó en un reactor batch semicontinuo a temperatura ambiente (25 °C), usando 100 mL de H₂O destilada, al cual se añadieron los materiales para evaluar su eficiencia bajo agitación magnética. En seguida se conectó a una tubería para introducir CO₂. Después, se purgó el sistema por 5 minutos y a continuación se encendió la lampara de luz visible (LED, 20W) colocada a un costado del reactor. La **Figura 12** muestra la representación de sistema de fotoreducción de CO₂. La toma de muestras del reactor se tomó a tres tiempos (15, 30 y 60 min).

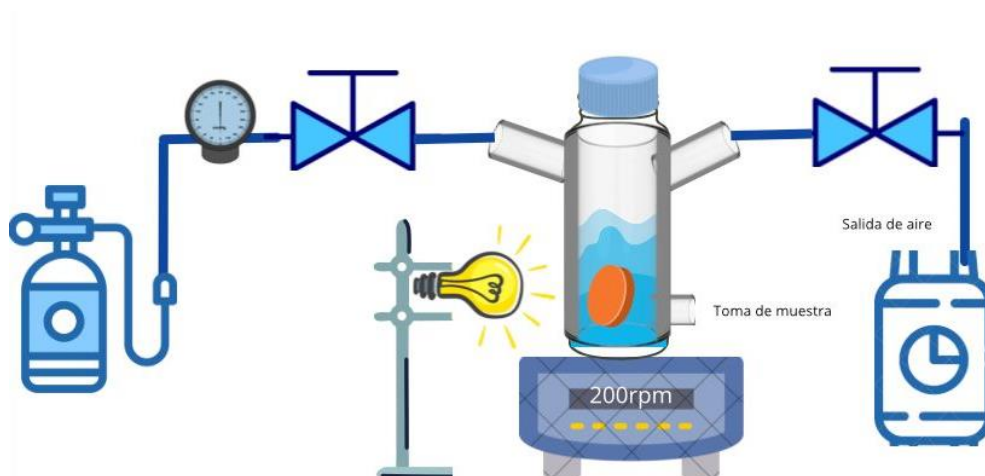


Figura 12. Esquema del sistema usado para la foto reducción de CO₂.

2.6 Evaluación de la producción de ácido fórmico (HCOOH) mediante cromatografía de líquidos de alta resolución

La cuantificación de la producción de HCOOH tras la fotoreducción de CO₂ se realizó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Este método permite identificar y cuantificar el compuesto resultante de la muestra obtenida en la fotoreducción de CO₂, mediante la separación de fases en un cromatógrafo Shimadzu modelo LC-2030C 3D Plus. Las condiciones de reacción fueron las siguientes: fase estacionaria, fase móvil de ácido fosfórico, flujo constante de 1 mL/min, detección a 210 nm, temperatura de 25 °C y un volumen de inyección de 25 µL. En algunas muestras se evaluó la formación de productos C1 (HCOOH), C2 (CH₃COOH) y C3 [(CH₃(CH₂)₂OH] del orden de mmol, cuyas producciones son una de las más competitivas reportadas hasta el momento.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de las algas pardas *Sargassum* sp. (Sg) y *Lobophora* sp. (Lp), de los biosoportes: (MOC/alga y CL/alga) y de los sistemas híbridos: biosoporte/ $K_3Bi_2I_9$, así como las eficiencias en la fotoreducción de CO_2 . En primera instancia se presentan los resultados de la caracterización de dos tipos de algas pardas y posteriormente, los resultados de los biosoportes y finalmente de los sistemas híbridos.

3.1. Caracterización de las algas pardas

Se realizó una caracterización integral de las algas pardas *Sargassum* sp. (Sg) y *Lobophora* sp. (Lp) mediante diversas técnicas como el análisis EDS reveló la composición química de ambas muestras, la difracción de rayos X permitió identificar su estructura cristalina. A través de microscopía electrónica de barrido (SEM), se observó la morfología, mientras que la espectroscopía UV-Vis mostró un pico de absorción asociado a la clorofila. Finalmente, el análisis FTIR identificó diversos grupos funcionales, y la termogravimetría (TGA) mostró variaciones en la estabilidad térmica de las muestras.

3.1.1. Caracterización estructural de las algas pardas

El análisis de EDS indicó la composición de los elementos químicos de ambas algas pardas y el porcentaje que las conforman. Los resultados obtenidos se muestran agrupados en la Tabla 3. En la cual se observa que ambas algas están formadas por carbono (C), Oxígeno (O), Calcio (Ca) y Azufre (S) en diferentes porcentajes. También se detectan otros

elementos, como Azufre, Cloro y Sodio, en menores cantidades, especialmente en *Lobophora* sp. Esto coincide con la heterogeneidad observada en el análisis SEM.

Tabla 3. Composición de elementos (wt. %) de las algas *Sargassum* sp. (Sg) y *Lobophora* sp. (Lp).

Elementos identificados (%wt.)		
Elemento	Sg.	Lp.
C	50	42.7
O	43	36.8
Ca	6	14.9
S	1	2.6
Cl	-	2.2
Na	-	0.9

La caracterización mediante difracción de rayos-X de las algas pardas permitió determinar las fases cristalinas presentes. Las dos muestras presentaron reflexiones asociadas con la presencia de calcita (CaCO_3), de acuerdo con la tarjeta JCPDS 29-0305, como se puede observar en la **Figura 13**. Adicionalmente, el alga *Lobophora* sp. presentó un segundo polimorfo de CaCO_3 asociado con la fase aragonita (tarjeta 41-1475). Sin embargo, está reportado que este polimorfo metaestable se transforma posteriormente en una fase más estable de calcita [84].

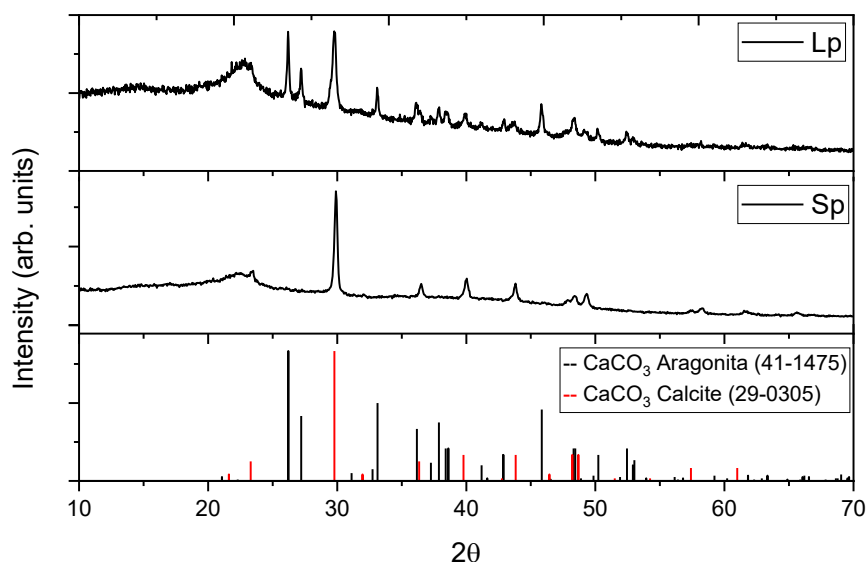


Figura 13. Difractograma de las algas *Sargassum* sp. (Sg) y *Lobophora* sp. (Lp).

3.1.2. Caracterización morfológica de las algas paradas

La morfología de las algas se caracterizó mediante Microscopia Electrónica de Barrido. Con base en el análisis de las micrográficas de las algas Sg y Lp, esta técnica evidenció una morfología tipo escama en ambas muestras. En el caso del alga Sg, se destaca la presencia de microesferas asociadas a carbonato de calcio (**Figura 14a,b**); mientras que, la muestra Lp presento una morfología más irregular cubierta de partículas de tamaño variado (**Figura 14c,d**) lo cual puede estar relacionado con una composición más compleja [85].

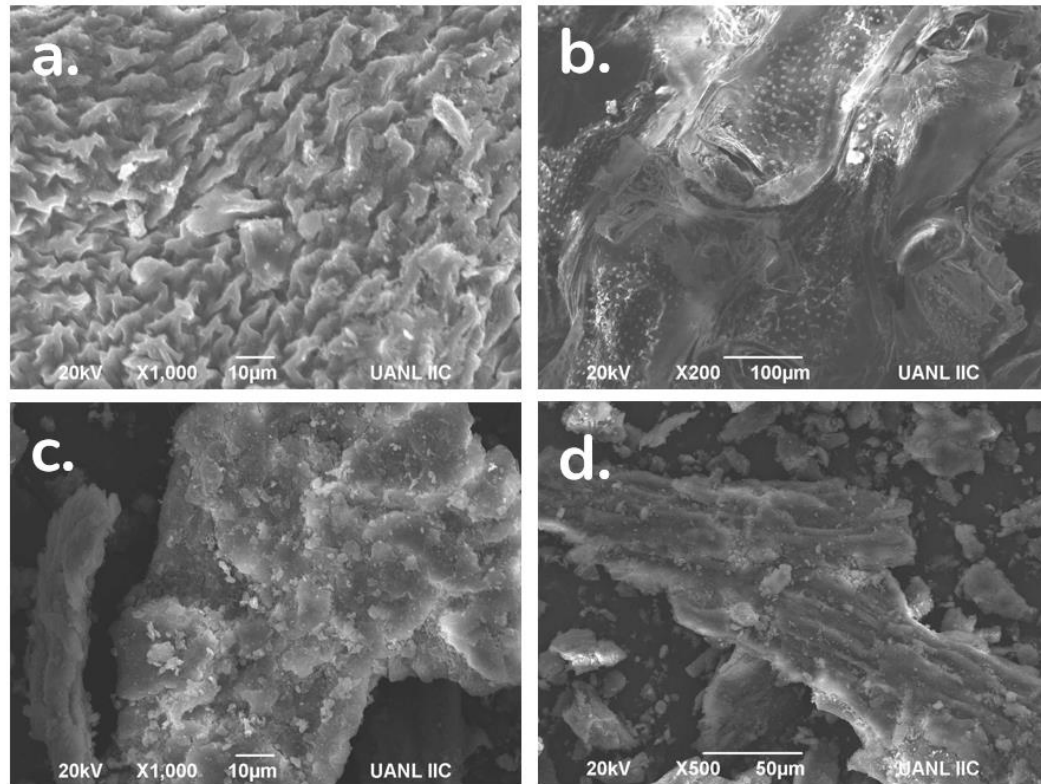


Figura 14. Micrografía SEM de las algas (a,b) *Sargassum* sp. y (c,d) *Lobophora* sp.

3.1.3. Caracterización óptica de las algas pardas

A continuación, se presenta el análisis comparativo de los espectros de absorción de las algas pardas Sg y Lp, representadas en la **Figura 15**, en las cuales podemos observar un pico de absorción en la región visible del espectro (600-700 nm), el cual corresponde a la clorofila a, un pigmento característico de las algas pardas analizadas.

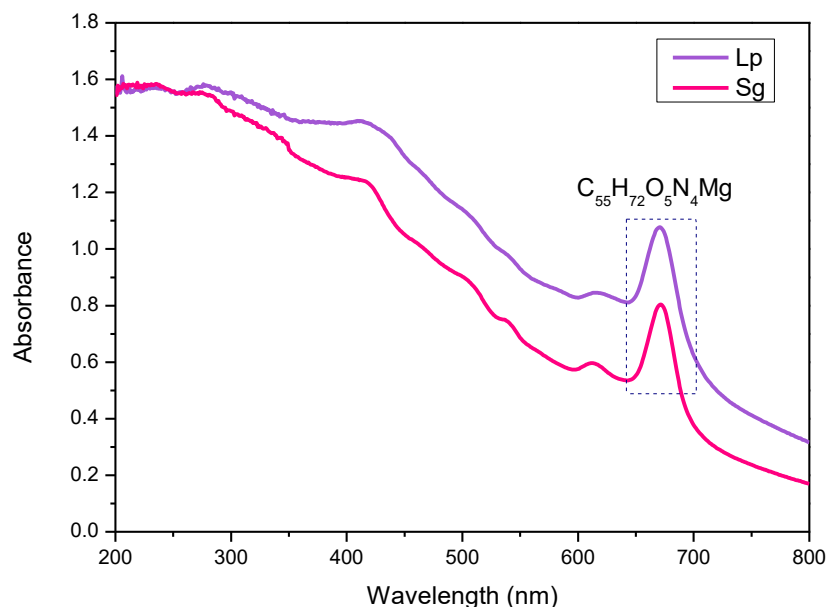


Figura 15. Espectros de Absorción UV-Vis de *Sargassum* sp. (Sg) y *Lobophora* sp. (Lp).

3.1.4. Caracterización textural de las algas pardas

Este método permitió determinar el valor del área superficial, así como el volumen y radio del poro de las algas colectadas, reportados en la **Tabla 4**. Los resultados muestran algunas diferencias en las propiedades texturales entre las muestras analizadas. El alga Sg presentó un área superficial más baja (4.4), pero un volumen de poro y un radio de poro más elevados en comparación con el alga Lp. Estas diferencias pueden dar lugar a variaciones en la porosidad de cada una de las algas, las cuales influyen por ejemplo en su capacidad de adsorción de contaminantes. En comparación con otras algas pardas, las estudiadas en esta investigación presentaron mayores valores de los parámetros estudiados [86-88].

Tabla 4. Propiedades textuales de las algas *Sargassum* sp. (Sg) y *Lobophora* sp. (Lp).

Propiedades textuales		
Parámetro	Sg.	Lp.
Área (m ² /g)	4.4	50.8
Radio de poro (nm)	1.130	0.412
Volumen de poro (cm ³ /g)	0.008	0.004

3.1.5. Caracterización de grupos funcionales de las algas pardas

Se analizaron las muestras mediante la técnica de espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) para identificar los grupos funcionales presentes. En la **Figura 16** se observan los espectros de las algas Sg y Lp, en donde se identifican diversas bandas asociadas con compuestos orgánicos. Por ejemplo, las bandas en la región de 3200-3400 cm corresponden con los grupos hidroxilo (-OH), los cuales están relacionados con la presencia de polisacáridos como alginatos y celulosa. Asimismo, se identifican bandas en la región de 2900 cm, características de los enlaces CH presentes en estructuras hidrocarbonadas. En la región de 1600 cm⁻¹, se observaron señales asociadas a enlaces C=C, lo que sugiere la presencia de compuestos aromáticos. Finalmente, en la región de 1100 cm se encontraron bandas relacionadas con los enlaces CO y S=O, lo que indica la posible presencia de sulfonatos y otros compuestos con azufre [89-91].

Los espectros de ambas muestras son similares, sin embargo, se observan diferencias en la intensidad de algunas bandas, lo que podría indicar variaciones en la concentración de ciertos compuestos.

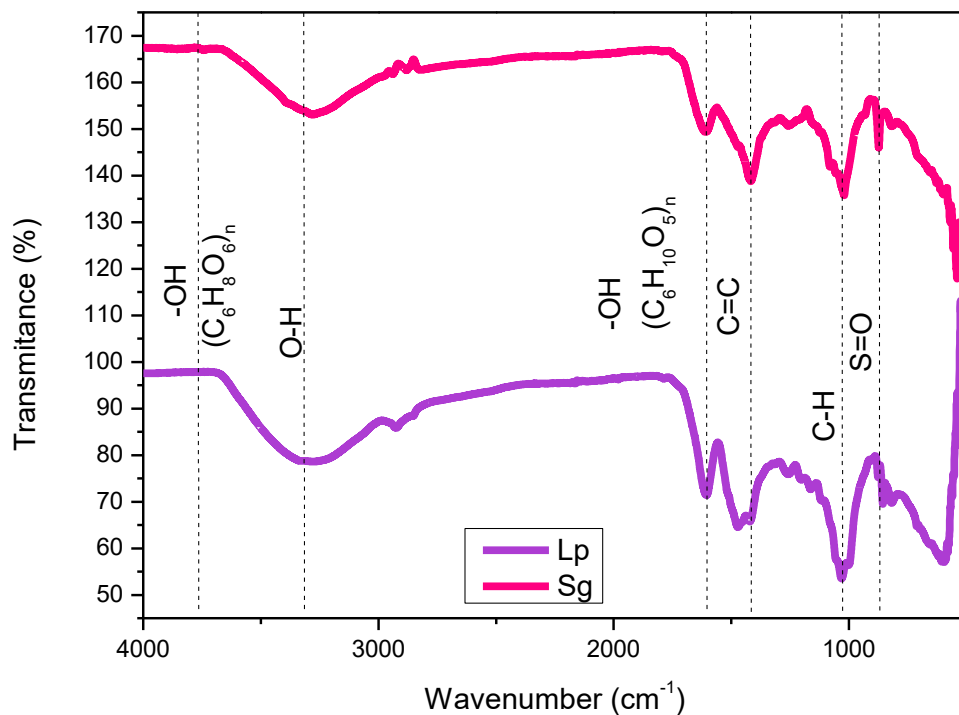


Figura 16. Espectros de FTIR de *Sargassum* sp. (Sg) y *Lobophora* sp. (Lp)

3.1.6. Caracterización termogravimétrica de las algas pardas

El análisis termogravimétrico permitió conocer la estabilidad térmica de las algas Sg y Lp. En la **Figura 17** se muestra la diferencia de pérdida de peso de tres principales zonas, la primera de 50- 200°C, asociada con la pérdida de agua, la segunda de 200-750°C corresponde con la pérdida de celulosa y finalmente la tercera zona de 750-850°C se asocia con la descomposición del carbonato de Calcio. Dicha pérdida fue ligeramente mayor en el alga Lp. Estos resultados coinciden con reportes previos [67,69,92-93].

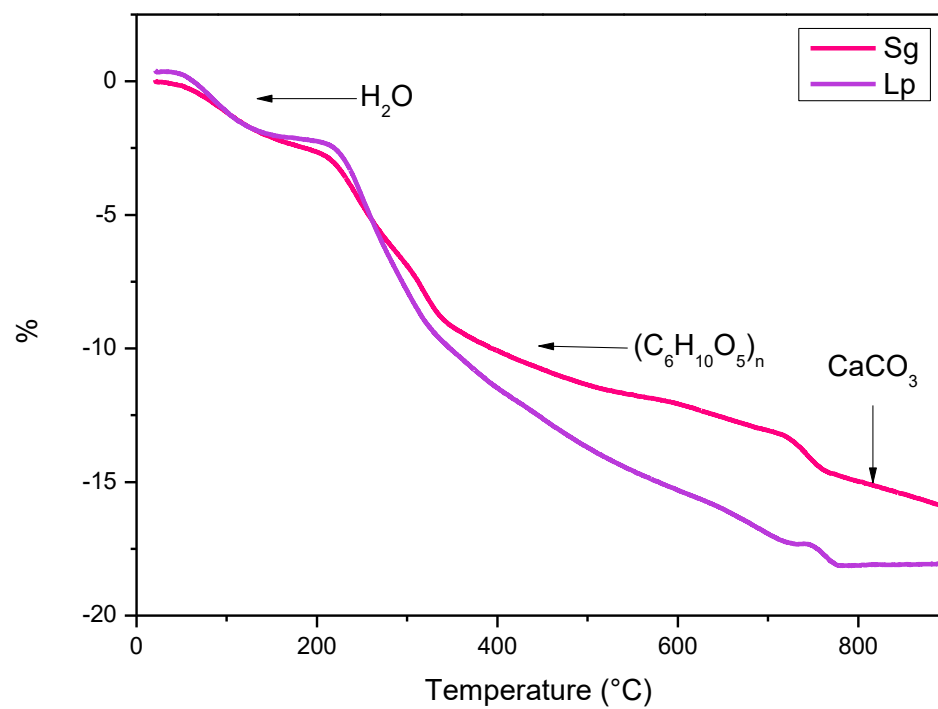


Figura 17. Análisis TGA de las algas Sg y Lp.

3.2 Biosoporte (MOC-alga)

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización del biosoporte (MOC-alga) demostrando un favorable acoplamiento entre el cemento inorgánico MOC y las algas pardas en diferentes concentraciones para aplicaciones medioambientales, por ejemplo, como soporte de fotocatalizadores para fotoreducción de CO₂.

3.2.1. Caracterización morfológica de biosoporte (MOC-alga)

La influencia de la incorporación de dos géneros de algas pardas en la morfología del MOC se evaluó mediante microscopía electrónica de barrido. La muestra de referencia presentó una morfología laminar con una estructura en forma de aguja característica de la fase 5 de este cemento (**Figura 18a**). A medida que se incorporan diferentes porcentajes de algas (5, 7 y 10 % en peso), se observa que éstas cubren progresivamente la superficie del MOC, dejando las láminas y agujas por debajo (**Figuras 18b-d**). En particular, la adición de *Sargassum* sp. generó una capa gruesa de aglomerados que podría proteger la superficie del cemento contra la humedad, además de favorecer la formación de una microestructura más porosa conforme aumentó su concentración (**Figura 18d**). En cambio, la microestructura de la muestra con *Lp* era más densa y homogénea que las de *Sg* (**Figuras 18e-g**).

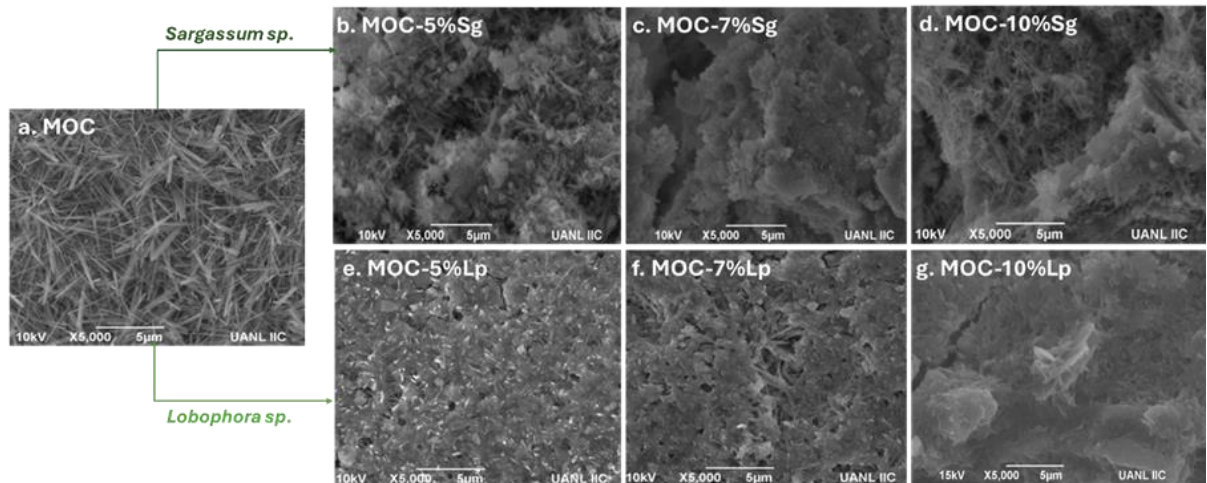


Figura 18. Micrografías de la referencia a. y de los biosoporte: b. MOC-5%Sg, c. MOC-7%Sg, d. MOC-10%Sg, e. MOC-5%LP, f. MOC-7%LP, y g. MOC-10%LP.

La distribución de las algas en el MOC se analizó mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS), monitoreando la presencia de Calcio como uno de sus principales componentes. La **Figura 19** ilustra el mapeo elemental del MOC-7%Lp, donde se observa una distribución homogénea de los elementos C, Ca y Si en el biosoporte.

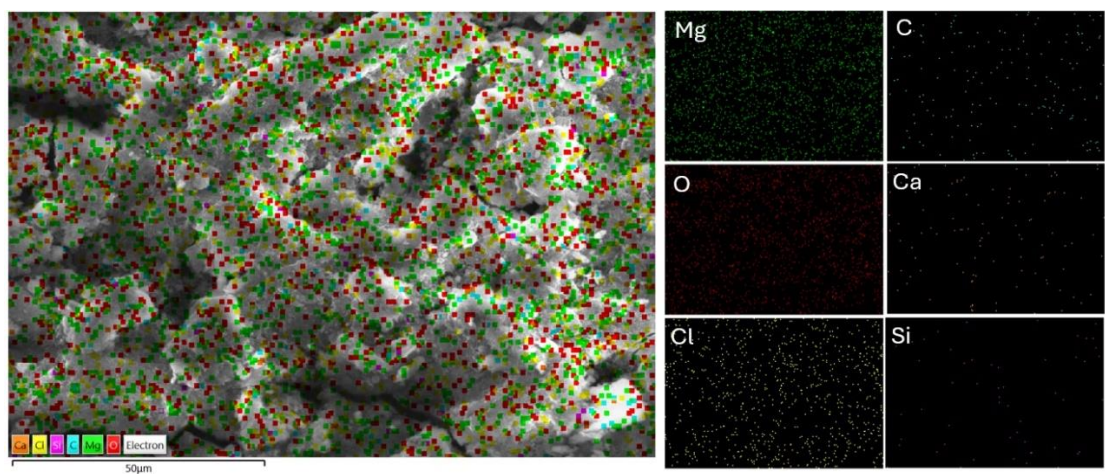


Figura 19. Mapeo elemental del biosoporte MOC-7%Lp.

3.2.2. Caracterización textural de los biosoportres (MOC- Sg y Lp)

Las muestras se sometieron a fisisorción de N₂, cuyos resultados se muestran en la **Tabla 5**. Como se puede observar, la incorporación del alga Sg en concentraciones de 5 y 7% disminuyó el área superficial del material con valores de 32 y 10 m²/g respectivamente, en comparación con MOC de referencia que presentó un valor de área superficial de 98 m²/g, lo cual puede deberse a una saturación de los poros del material. No obstante, el volumen de poro resultante revela la presencia de macroporos, los cuales favorecen los procesos de adsorción. En contraste, la adición de alga Lp con las concentraciones mencionadas generó un incremento en el área superficial con valores de 434 y 824 m²/g, respectivamente y un menor volumen de poro 0.032 y 0.049 cm³/g, respectivamente en comparación con la muestra MOC. Sin embargo, una adición del 10% de algas provocó la disminución de los valores (154m²/g y 0.09cm³/g) con respecto a porcentajes menores. Lo que se puede asociar con una sobresaturación de la superficie lo que provocó el bloqueo de los poros. En consecuencia, la concentración de % de biomasa añadida provocó un efecto directo en la porosidad del material, su estructura y propiedades texturales.

Tabla 5. Propiedades Texturales de los biosoportres con *Sargassum* sp. *Lobophora* sp.

Parámetro	MOC	MOC-5%Sg	MOC-7% Sg	MOC-5%Lp	MOC-7%Lp	MOC-10%Lp
Área (m ² /g)	98	32	10	434	824	154
Radio de poro (nm)	0.16	0.16	0.16	0.18	0.12	0.12

Volumen de poro (cm³/g)	0.078	0.014	0.68	0.032	0.049	0.09
---	-------	-------	------	-------	-------	------

3.2.3. Caracterización de grupos funcionales de los biosoportes (MOC-Sg y Lp)

Se analizaron los sistemas híbridos mediante la técnica de espectroscopia de infrarrojo por transmitancia de Fourier. En la **Figura 20** se observan los espectros de absorción de *Saragassum* sp. y *Lobophora* sp. en la cual todas las muestras mostraron una banda alrededor de 3400 cm⁻¹ relacionada con el estiramiento O-H de la molécula de H₂O, otra banda alrededor de 1154 cm⁻¹ asociada con la carbonatación de la superficie, y la banda a 580 cm⁻¹ confirmó la presencia de MgO [96]. Cuando se introdujeron las algas en el biosoporte, aparecieron bandas adicionales, por ejemplo, a 3670 cm⁻¹ asociadas con la vibración O-H de los alginatos [97,98], y la celulosa (C₆H₁₀O₅)_n alrededor de 1700 cm⁻¹ [98,99]. Dichos grupos funcionales pueden desempeñar un papel importante en las interacciones químicas y biológicas de las algas pardas, así como en sus propiedades físicas y mecánicas [100].

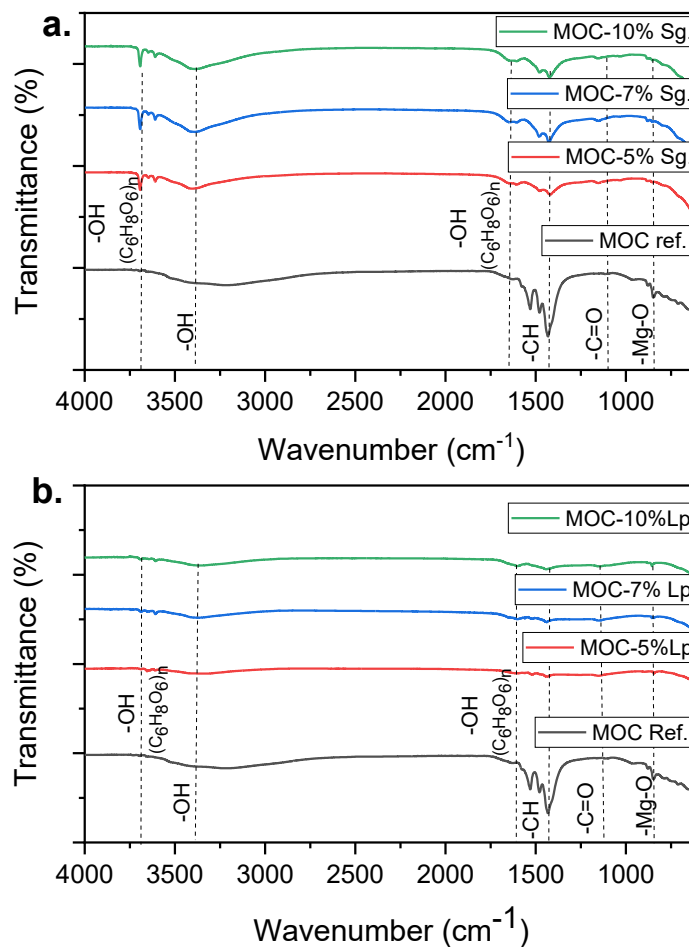


Figura 20. Espectros FTIR de los biosoportes: con diferentes porcentajes de alga: (a). *Sargassum* sp. y (b). *Lobophora* sp.

3.2.4. Caracterización mecánica del biosoporte (MOC- Sg y Lp)

La resistencia a la compresión del biosoporte con adición de *Sargassum* sp. y *Lobophora* sp. respectivamente después de 28 días se muestra en la **Figura 21**. La adición del alga disminuyó la resistencia en los soportes en un 16 y 37% con 5 y 7% en peso de Sg y Lp, respectivamente. Estos resultados concuerdan con resultados recientes [101-103].

El origen de esta disminución podría deberse a una mayor porosidad en las muestras y la absorción de agua.

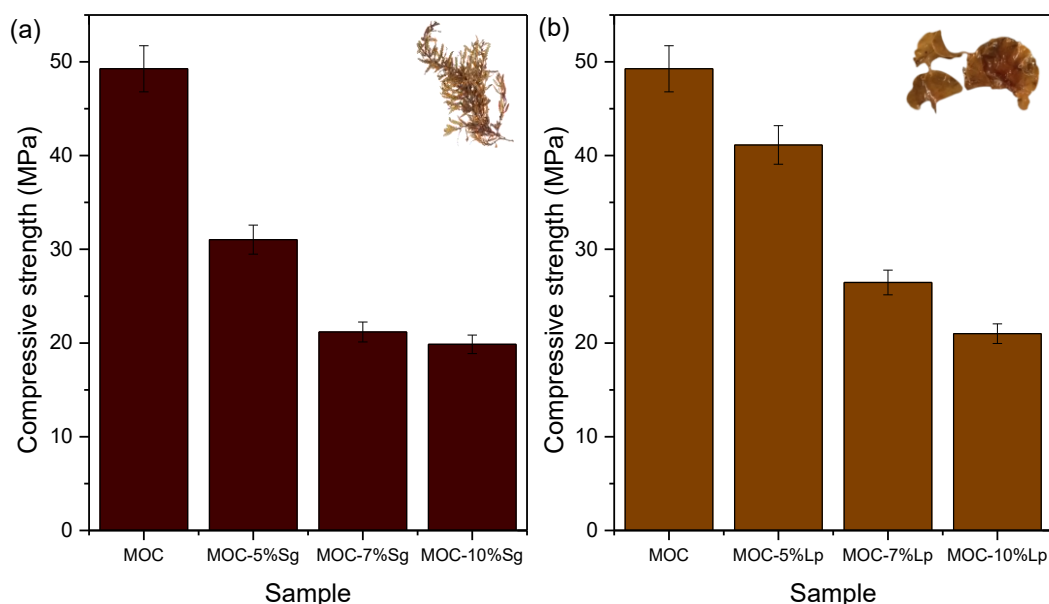


Figura 21. Resistencia a la compresión de muestras de MOC con diferentes porcentajes de masa de *Sargassum* sp. y *Lobophora* sp.

3.2.5. Hidratación y endurecimiento del biosoporte (MOC-Lp)

Para conocer la hidratación y el endurecimiento de las pastas de cemento con y sin las algas, la muestra con 5 % en peso de *Lobophora* sp. se monitoreó mediante espectroscopia de impedancia. La evolución de la parte imaginaria (Z'') y la parte real (Z') de la impedancia para cada pasta después de 4 h y 4 d, se muestra en la **Figura 22**. El aumento en el tiempo de hidratación (de 4 h a 4 d) se desplazó hacia arriba en la curva, lo que indica un aumento en la resistencia global. Este cambio podría estar relacionado con la concentración de iones en la fase líquida y la porosidad de la pasta a medida que avanzaba la hidratación. Además, la porosidad tiene una influencia en la resistividad; en general, una mayor porosidad

promueve una menor resistividad al consumir electrolito dentro de los poros capilares y la disminución de la conectividad de las estructuras de los poros [104,105].

El comportamiento de la impedancia en los biosoportres de MOC está directamente influido por el grado de hidratación, esto se debe a que la presencia de agua en los soportes favorece la movilidad iónica y se registran valores bajos de impedancia. A medida que se reduce la hidratación y se forman fases cristalinas más estables, disminuye la cantidad de iones móviles, lo que incrementa la resistividad y, por ende, la impedancia [106, 107]

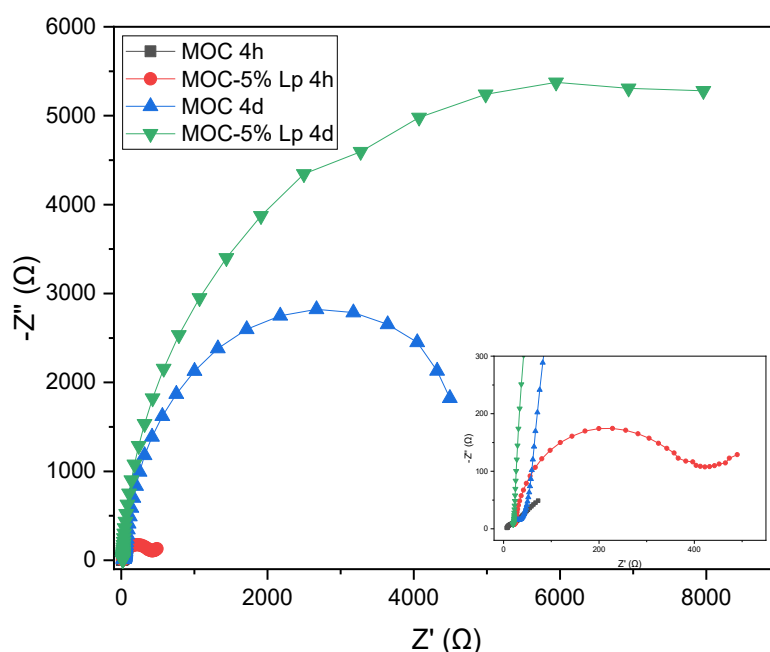
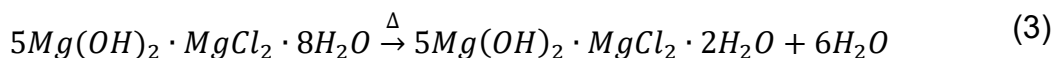


Figura 22. Diagramas de Nyquist de la referencia MOC y con *Lobophora* sp. después de 4 h y 4 d. Se incluye una vista más cercana de los datos a frecuencias más altas.

3.2.6. Dilatometría del biosoporte (MOC- Lp)

Se utilizó dilatometría para investigar la expansión térmica de los biosoportres con *Lobophora* sp. hasta el agrietamiento y la contracción. Como se muestra en la **Figura 23**,

se observó la primera expansión lineal desde temperatura ambiente hasta 120 °C. Esto se relacionó con la liberación de seis moléculas de agua, según la **Ecuación 3**:



Después, las moléculas de agua restantes se liberaron gradualmente, causando una contracción de las muestras a partir de los 120 °C. La adición de algas pardas (Lp) mostró una contracción mayor probablemente debido a su naturaleza orgánica; principalmente, la muestra con 10 %Lp. Además, es importante mencionar que el Lp consiste en una mezcla de Calcita y Aragonita, lo que puede influir en el comportamiento térmico de las pastas. Por ejemplo, el polimorfo aragonita tiene un coeficiente de expansión térmica volumétrica más alto que la calcita, lo que se ha relacionado con la simetría de ambos polimorfos [108].

En general, la adición de algas aumentó alrededor de la expansión (<5,1 %) y la contracción (<15 %) de las pastas en el intervalo de temperatura estudiado.

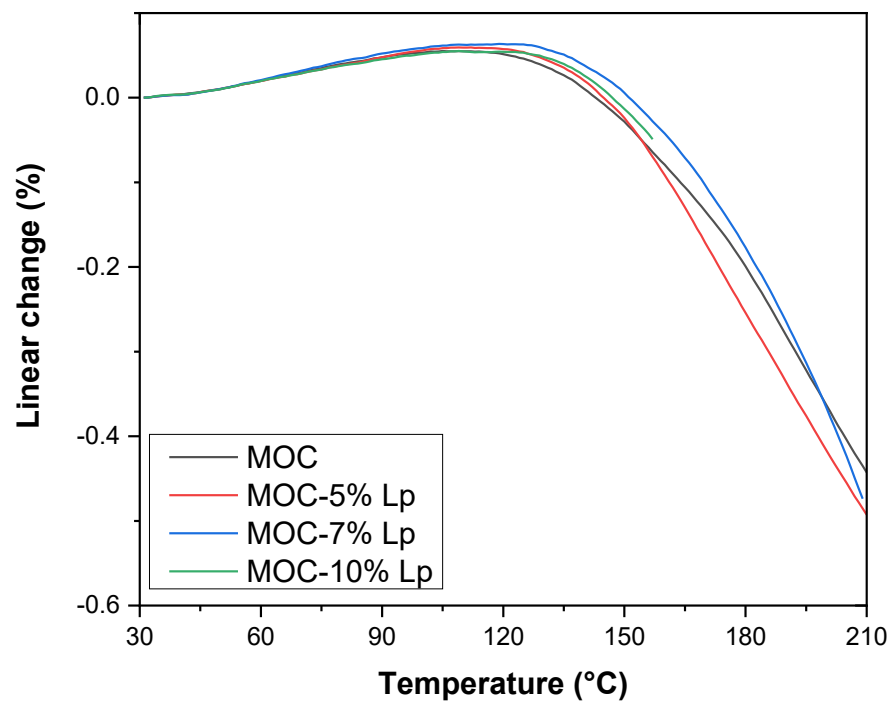


Figura 23. Curvas de dilatometría del MOC con *Lobophora* sp.

3.3 Sistema híbrido: Biosoporte (MOC-Lp)/KBI

A continuación, se muestran los resultados de la caracterización y actividad fotocatalítica de los sistemas híbridos: biosoporte (MOC-Lp) /KBI, los cuales respaldan su potencial en proceso de reducción de CO₂ y generación de combustibles solares.

3.3.1. Caracterización estructural del sistema híbrido (MOC-Lp)/KBI

Al analizar los difractogramas de la **Figura 24a**, se observa que tanto el soporte inorgánico de referencia (MOC) como el sistema MOC/KBI presentan las reflexiones características de la fase cristalina 5 ($5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) del sistema $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, evidenciando que esta fase se conserva tras la incorporación del fotocatalizador. La aparición de las reflexiones correspondientes a la perovskita KBI confirma su impregnación en el soporte

En la **Figura 24b**, al comparar los patrones de difracción obtenidos con distintos porcentajes de incorporación del alga *Lobophora sp.* (5, 7 y 10 % en peso), se aprecia que las reflexiones de la fase 5 permanecen presentes, lo que demuestra la estabilidad estructural del MOC incluso en presencia de biomasa. Además, la perovskita se mantiene detectable en los patrones, lo que evidencia que la adición del alga no inhibe su incorporación al soporte, sino que contribuye a generar un entorno híbrido más heterogéneo.

Estos resultados confirman que la combinación de MOC, *Lobophora sp.* y KBI conduce a un sistema híbrido estable, en el cual la matriz inorgánica conserva su fase cristalina principal y es capaz de alojar tanto al biomaterial como al fotocatalizador.

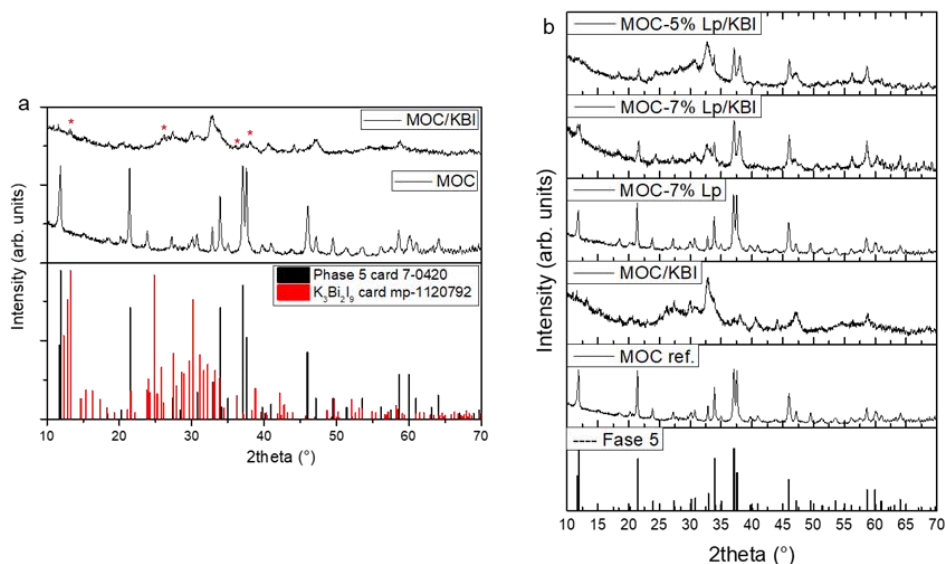


Figura 24. Difractogramas de la comparación entre la fase cristalina MOC y MOC/KBI (a) y (b) al usar diferentes porcentajes de alga Lp.

3.3.2. Caracterización óptica del sistema híbrido (MOC-Sg y Lp/KBI)

Los MOC son estructuras versátiles a las que se les puede agregar diversos compuestos para mejorar su eficiencia y sus propiedades texturales dependiendo el uso que se le vaya a otorgar, dentro de sus aplicaciones potenciales destacan: la purificación del aire, el agua y la captura de CO₂ mediante procesos fotocatalíticos debido a su capacidad de adsorción [94,85]. Sin embargo, para mejorar la eficiencia fotocatalítica es necesaria la impregnación de fotocatalizadores como las perovskitas de haluro de bismuto.

En los espectros de absorción de los sistemas híbridos (biosoporte/fotocatalizador) se observa que, la adición de algas pardas mejoró la absorción de luz en la región visible entre 650 y 700 nm. Este efecto se atribuyó a la presencia de clorofila en las muestras, siendo más notable en las muestras con el alga Lp, como se ilustra en la **Figura 25b**.

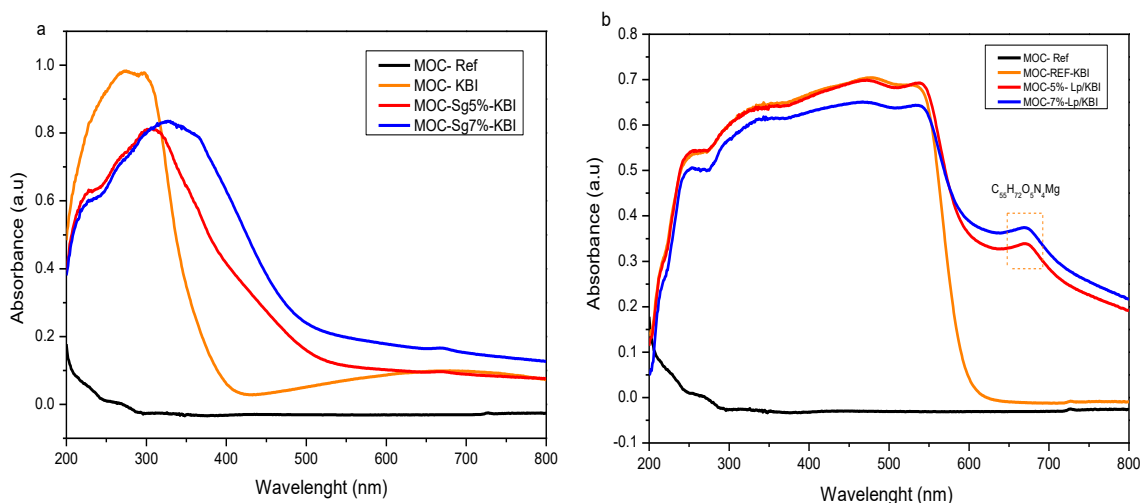


Figura 25. Espectros de absorción de UV-Visible de los sistemas híbridos biosoporte (Sg)/KBI (a) y biosoporte (Lp) /KBI.

3.3.3 Resultados de la fotoreducción de CO₂ del sistema híbrido (MOC-Sg y Lp /KBI)

Posterior a la caracterización de los sistemas híbridos se evaluó su actividad fotocatalítica para la reducción de CO₂ y se encontró que, el producto principal fue HCOOH. En la **Figura 26** se muestra la producción de HCOOH con los biosoportes y los sistemas híbridos con sargazo. Los materiales sin KBI (de referencia) mostraron una baja actividad (<300 $\mu\text{mol h}^{-1}$) en comparación con los que contenían el fotocatalizador, los cuales mostraron altas eficiencias (>900 $\mu\text{mol h}^{-1}$); particularmente la muestra con 5 % en peso resultó con la mayor producción. Por lo que, se encontró que mayores % de Sg en el soporte inorgánico, favorecieron una menor producción de HCOOH.

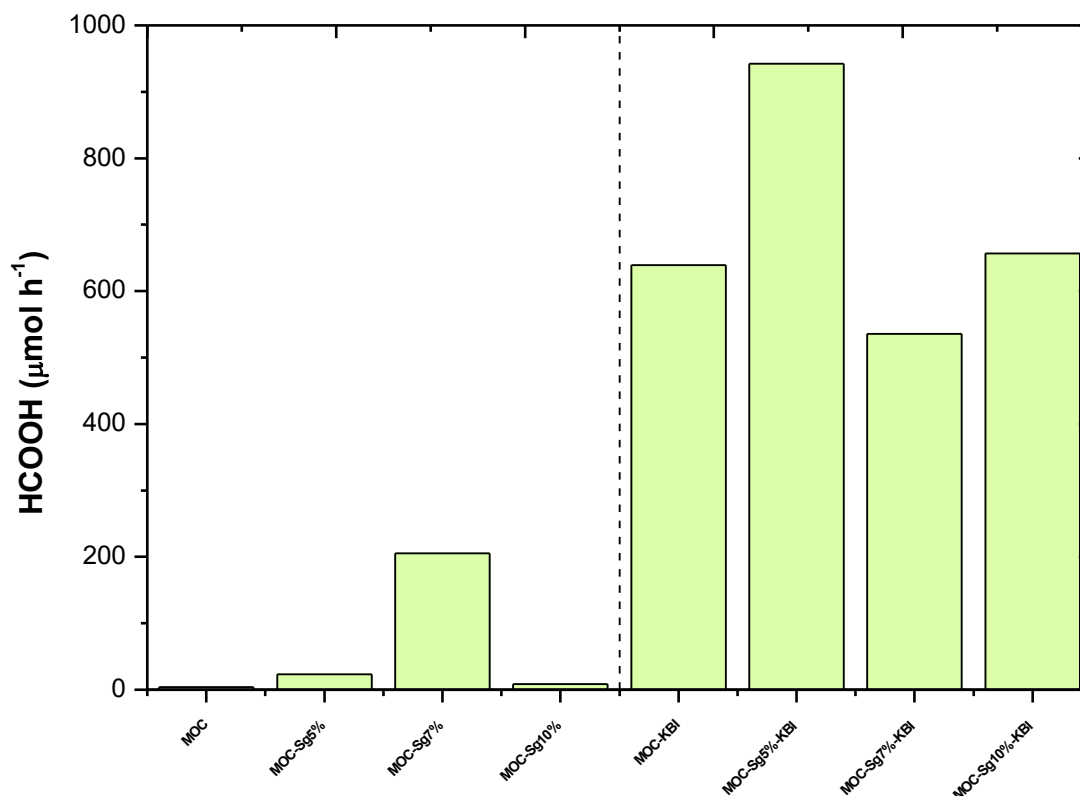


Figura 26. Comparación de la producción de HCOOH de los sistemas híbridos (con sargazo) y los soportes de referencia bajo irradiación visible durante la reacción de fotoreducción de CO₂ por 5 horas.

La **Figura 27** muestra la producción de HCOOH y CH₃OH de ambos sistemas híbridos obtenidos con dos tipos de algas pardas. La comparación entre ambos sistemas híbridos en la fotoreducción de CO₂ indicó que, en ambos sets, la muestra con 5%wt. de alga favoreció la mayor producción de HCOOH. También, se evaluó la producción de metanol en ambos sistemas. Se observó una mayor producción de metanol al usar Sg respecto a los sistemas Lp., y se encontró que una mayor cantidad de Sg favoreció una mayor producción de metanol. Sin embargo, la producción obtenida no resultó significativa (<15 μmol h⁻¹) en comparación con el ácido fórmico.

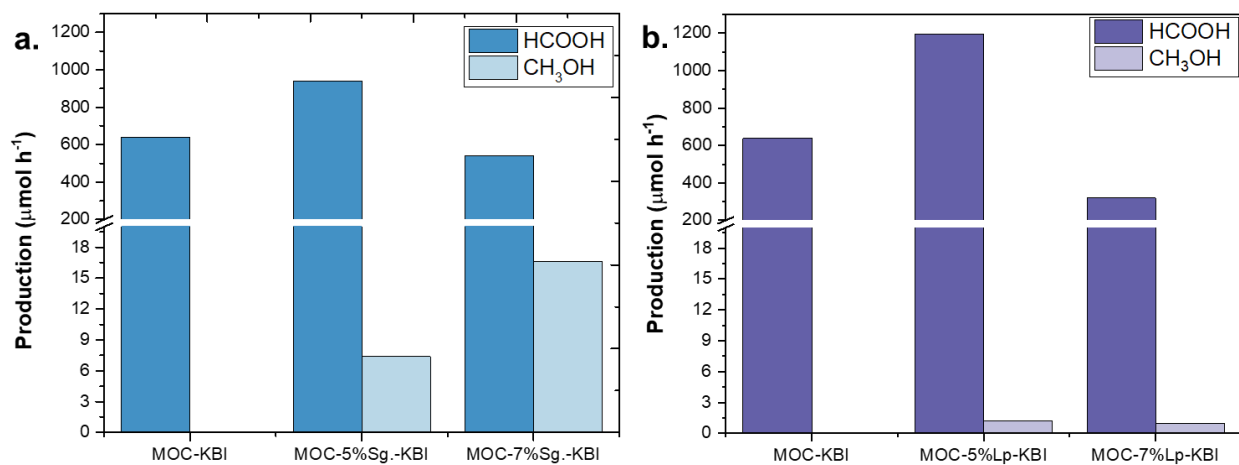


Figura 27. Comparación de la producción de HCCOH y CH₃OH de los sistemas híbridos MOC-Sg%/KBI (a) y MOC-Lp%/KBI (b) bajo irradiación visible durante la reacción de fotoreducción de CO₂ por 5 horas.

3.4 Sistema híbrido: Biosoporte (CLLp) /KBI

Los resultados de la caracterización y evaluación de la actividad fotocatalítica de los sistemas híbridos: CL-alga/KBI se presentan a continuación, evidenciando un acoplamiento efectivo entre la arcilla y las algas pardas en una concentración del 5% en peso. Esto para proponer un sistema alternativo de materias primas asequibles, de bajo costo y una rápida fabricación, lo que favorecerá su aplicación en la producción de combustibles alternativos y otras soluciones medioambientales.

3.4.1. Caracterización estructural del Sistema híbrido (CLLp /KBI)

El análisis de difracción de rayos-X en polvo de la muestra de la arcilla de referencia permitió identificar tres fases cristalinas principales: (i) Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, tarjeta 33-0311), (ii) Clinocloro [$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, tarjeta 46-1322] y (iii) Anhidrita (CaSO_4 , tarjeta 83-2270). Estas fases permanecieron estables tras la incorporación del alga Lp e incluso después de la impregnación con la perovskita. Sin embargo, en el sistema híbrido, se observó un aumento en la cristalinidad, probablemente debido a una reducción en la porosidad de la muestra. Además, se detectó una débil reflexión en torno a $2\theta = 26^\circ$, correspondiente a la fase $\text{K}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ [109], como se muestra en la **Figura 28**. Cabe destacar que, después de la reacción, esta reflexión persistió, aunque con una disminución en su intensidad, al igual que en el resto de las fases. Por otro lado, algunos elementos identificados mediante análisis de XRF no fueron observables en el patrón de XRD, posiblemente debido a su baja concentración en las muestras de arcilla.

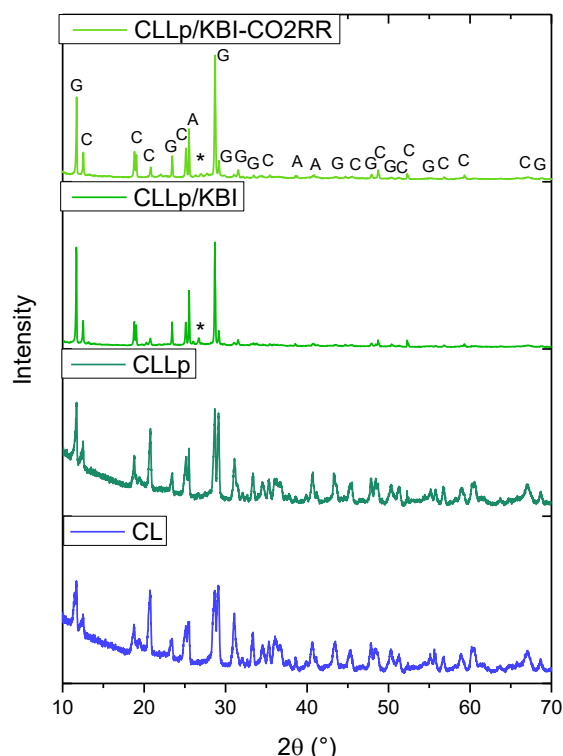


Figura 28. Difractogramas de la comparación entre la fase cristalina arcilla (CL), biosoporte (CLLp), biosoporte/KBI y biosoporte/KBI después de la fotoreducción de CO₂.

* Fase **cristalina** de la perovskita K₃Bi₂I₉.

3.4.2. Caracterización morfológica del Sistema híbrido (CLLp /KBI)

Se realizó un análisis SEM en el sistema de referencia y en el sistema híbrido para examinar la dispersión de las algas y la perovskita en el soporte. La morfología de la arcilla de referencia está compuesta por partículas en forma de láminas, algunas con una estructura hexagonal, como se observa en la **Figura 29a**. Esta morfología es característica de las arcillas naturales. Por otro lado, la microestructura del alga presentó partículas irregulares, como se ha reportado previamente [110]. La incorporación de las algas en los soportes generó partículas aglomeradas que rodeaban las láminas de arcilla (**Figura 29b**), las cuales se compactaron tras la impregnación con perovskita (**Figura 29c**). Una vista más

detallada de la microestructura del sistema híbrido evidenció la presencia de la perovskita KBI en forma de varillas alargadas distribuidas sobre los biosoportes.

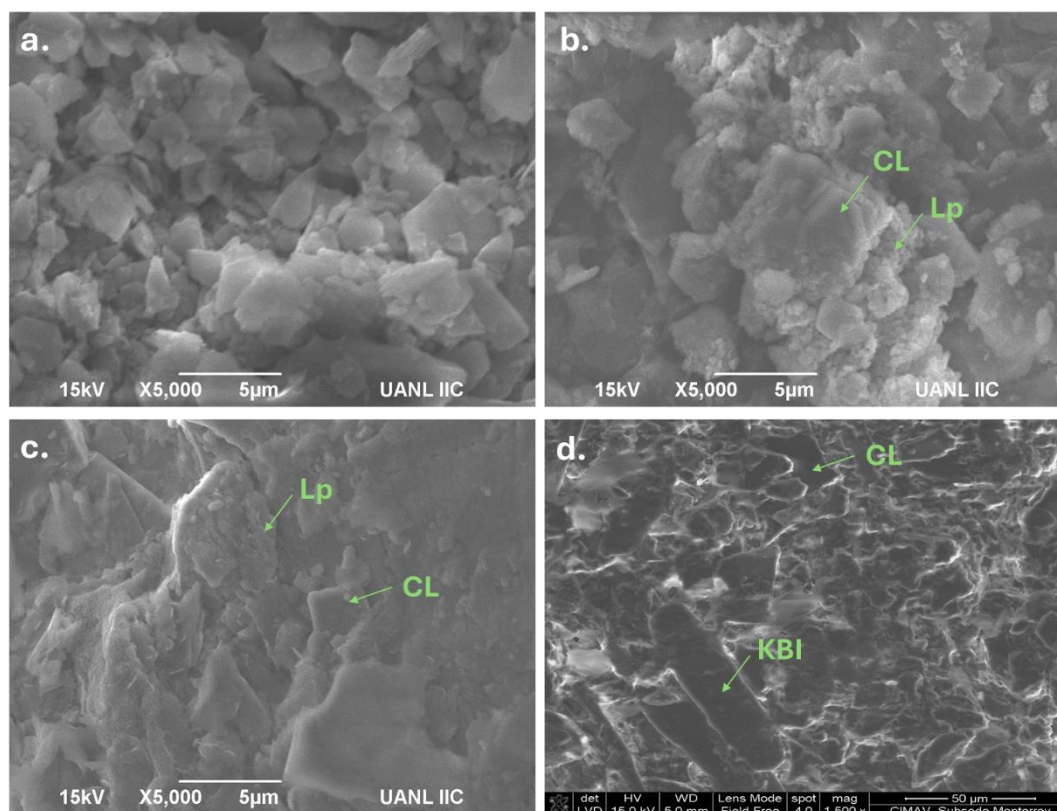


Figura 29. Micrografía de arcilla de referencia CL (a), CLLp (b), y del sistema CLLp-KBI (c-d).

3.4.3. Caracterización óptica del Sistema híbrido (CLLp) /KBI

Las muestras fueron analizadas mediante espectroscopia UV-Vis para estudiar sus transiciones electrónicas, obteniendo los espectros de absorción que se muestran en la **Figura 30**. En la muestra de referencia, se detectó una banda de absorción alrededor de 270 nm, lo que es característico de las arcillas [111]. Por otro lado, los biosoportes

exhibieron una banda en 665 nm, correspondiente a la Clorofila A [112]. Esta señal proviene de una transición electrónica $\pi \rightarrow \pi^*$, originada en el anillo de porfirina dentro de la región Q_y en las algas, la cual hace referencia a un conjunto de bandas de absorción característica de la clorofila a ubicadas entre los 660 y 680 nm en el espectro de luz visible, relacionadas a las transiciones electrónicas dentro de la molécula de la clorofila [113,114]. La inclusión de clorofila en el sistema fotosensible podría resultar ventajosa, ya que actúa como donadora de electrones y favorece la fotoactividad del material [115].

En el sistema híbrido, se identificaron dos bandas de absorción principales: (i) una en la región de 600 nm, asociada con la brecha de banda de la perovskita (2.0 eV), y (ii) otra en 665 nm, atribuida a la absorción de la clorofila. La combinación de estas transiciones podría mejorar la eficiencia de la fotorreacción, ya que la clorofila puede facilitar la transferencia de electrones hacia la banda de conducción del KBI, promoviendo la formación de especies radicales involucradas en la reducción del CO_2 .

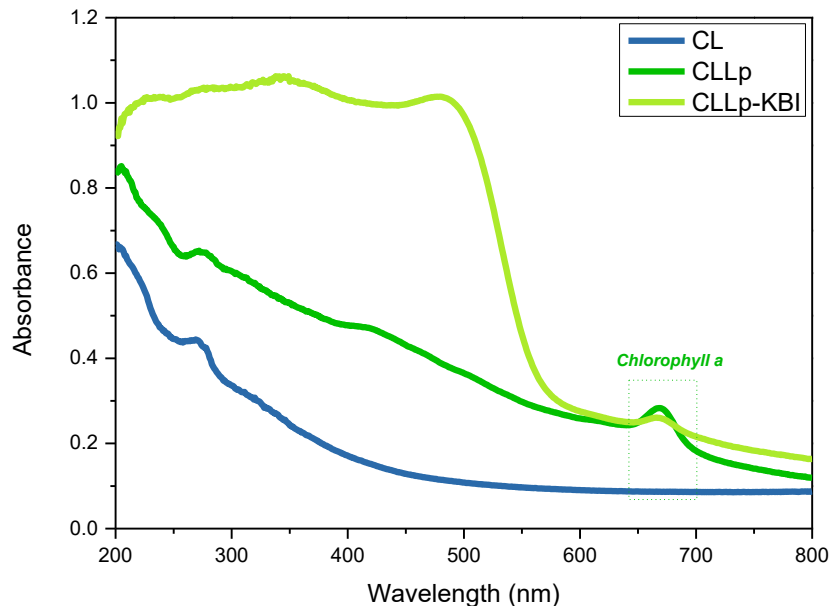


Figura 30. Espectros de absorción de UV-Visible del soporte de referencia (CL), el biosoporte (CLLp) y el sistema híbrido (CLLp/KBI).

Las muestras también fueron evaluadas bajo fotoluminiscencia, debido a la presencia de clorofila identificada en las técnicas anteriores. La **Figura 31** muestra los espectros de emisión de fotoluminiscencia del sustrato con y sin alga, así como de la perovskita soportada. La muestra CLLp presentó cuatro bandas de emisión en: (i) 570, (ii) 607, (iii) 643 y (iv) 680 nm. Las primeras bandas están asociadas con las arcillas presentes en el sustrato, ya que también se observaron en la muestra de referencia (aunque con menor intensidad); sin embargo, su origen no es completamente claro en la bibliografía. Por otro lado, las bandas en 643 y 680 nm están relacionadas con la presencia de clorofila, lo que concuerda con los resultados obtenidos por espectroscopia UV-Vis.

En el sistema híbrido, estas bandas no se identificaron con facilidad, posiblemente debido a la impregnación de la perovskita. En contraste, las primeras bandas se intensificaron en la región de 520-560 nm, lo que podría atribuirse a una emisión superpuesta generada por la perovskita en el mismo intervalo espectral. Además, el aumento en la emisión de fotoluminiscencia en el sistema híbrido podría estar relacionado con la clorofila quimisorbida en la perovskita, la cual actúa como donadora de electrones a través del sitio de unión del ácido carboxílico, incrementando la señal observada en los espectros de fotoluminiscencia.

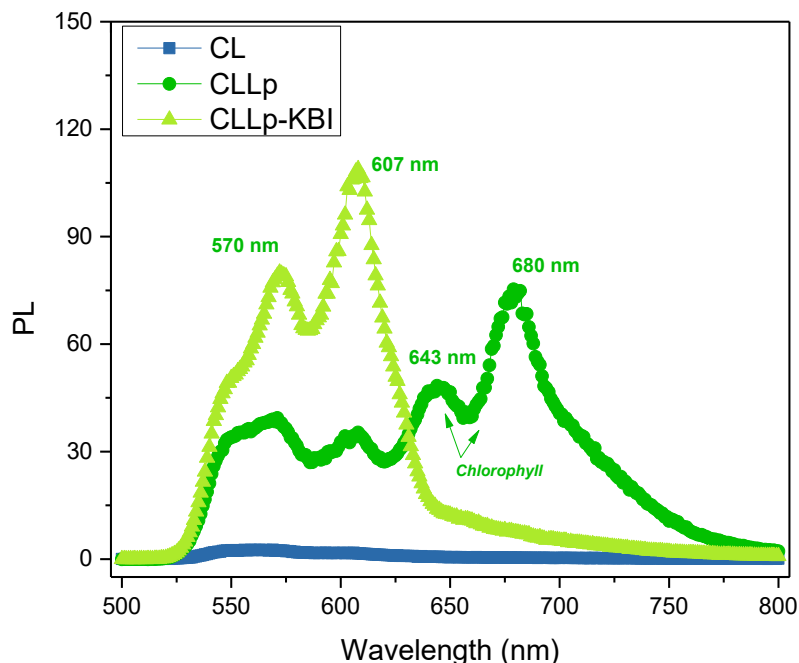


Figura 31. Espectro de fotoluminiscencia del soporte de referencia (CL), el biosoporte (CLLp) y el sistema híbrido (CLLP/KBI).

3.4.4. Caracterización textural del Sistema híbrido (CLLp /KBI)

Las isotermas de adsorción-desorción de N_2 a 77 K para las muestras de referencia y el sistema híbrido se presentan en la **Figura 32a**. De acuerdo con la clasificación de la IUPAC, las muestras CL y CLLp-KBI exhiben isotermas de tipo II, típicas de materiales no porosos o macroporosos donde la adsorción ocurre en múltiples capas. En contraste, la muestra CLLp muestra una isoterma de tipo IV con un bucle de histéresis H_2 , característico de materiales mesoporosos con estructuras de poros desordenadas y distribuciones de tamaño y forma de poro no bien definidas, lo que sugiere la presencia de constricciones en forma de cuello de botella.

Estas constricciones pueden ser beneficiosas para encapsular materiales y evitar su degradación en agua o bajo condiciones ambientales. Como se observa en la **Figura 32a**, después de la impregnación de la muestra CLLp con la perovskita, los poros tienden a ser ocupados por este material y la clasificación de la isoterma cambia de IV a II en el sistema híbrido (CLLp-KBI), lo que confirma su encapsulación en la estructura de la arcilla. Además, el análisis del radio de poro mediante el método de Barrett-Joyner-Halenda (BJH) en la **Figura 32b** evidencia una mayor porosidad en la muestra CLLp, la cual es rellenada con la perovskita.

El área superficial se determina mediante el método BET a partir de la isoterma de adsorción de N₂, mientras que el volumen promedio y el tamaño de poro de las muestras se obtuvieron por el método Barrett-Joyner-Halenda (BJH), cuyos resultados se presentan en la **Tabla 6**. La adición del alga resultó en un aumento de la porosidad, que posteriormente se reduce en el sistema híbrido debido al relleno de los poros por la perovskita. En cuanto al radio de poro, el sistema CLLp-KBI exhibió valores hasta cuatro veces mayores que la muestra CLLp, probablemente debido a las propiedades superficiales de la perovskita. Estos mesoporos favorecen la difusión de CO₂, especialmente cuando las áreas superficiales no son altas (>500 m²/g), como es el caso.

Tabla 6. Propiedades textuales de la arcilla (CL), del biosporte (CLLp) y del sistema híbrido (CLLp/kbi).

Muestra	Área superficial (m ² /g)	Volumen de Poro (cm ³ /g)	Radio de Poro (Å)
CL	124	0.018	136.7
CLLp	114	0.045	16.4
CLLp-KBI	43	0.002	78.1

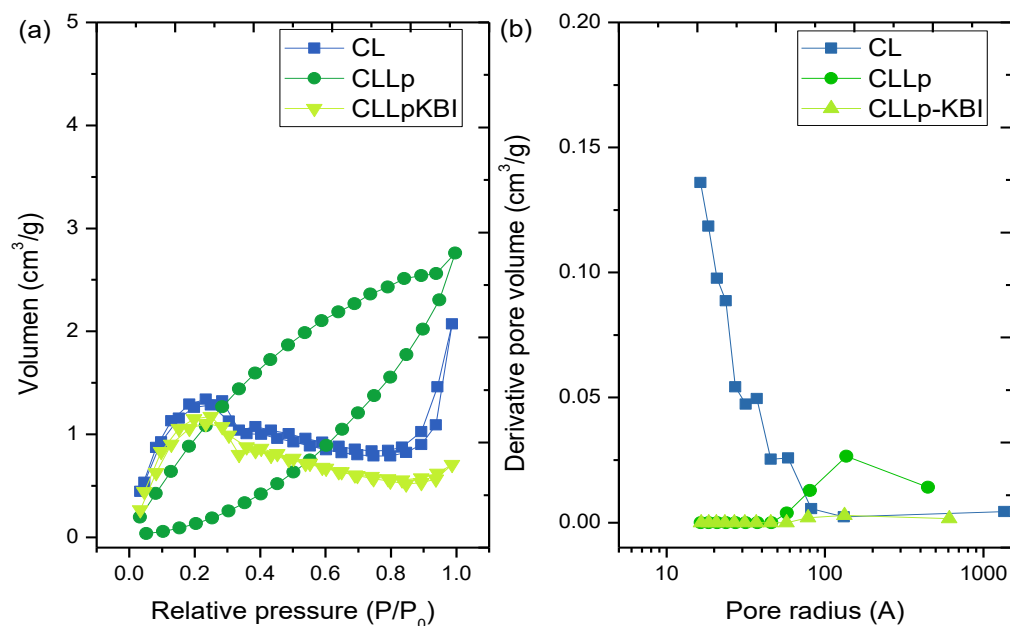


Figura 32. (a) Isothermas N₂ y (b) distribución del tamaño de poro del soporte de referencia (CL), el biosoporte (CLLp) y el sistema híbrido (CLLP/KBI).

3.4.5. Caracterización de grupos funcionales del Sistema híbrido (CLLP /KBI)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se empleó para identificar los grupos funcionales presentes en las muestras (**Figura 33**). El espectro de la referencia mostró bandas características de las arcillas. Entre ellas, se identificaron señales en torno a 3600, 3390 y 1615 cm^{-1} , las cuales están asociadas a los grupos hidroxilo (-OH) ubicados en las capas octaédricas y tetraédricas de la arcilla [116]. Asimismo, se detectaron bandas en 990 y 690 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de los enlaces Si-O y Si-O-Si (Al) característicos de estos materiales [117]. Por otro lado, la señal atribuida a los carbonatos (C=O) se ubicó alrededor de 750 cm^{-1} , mientras que el pico de vibración

relacionado con el grupo S-O se registró en 1115 cm^{-1} [118]. La incorporación de las algas no generó cambios significativos en el espectro, salvo por la aparición de una ligera banda alrededor de 3700 cm^{-1} , la cual ha sido previamente reportada en estudios sobre algas [119, 120].

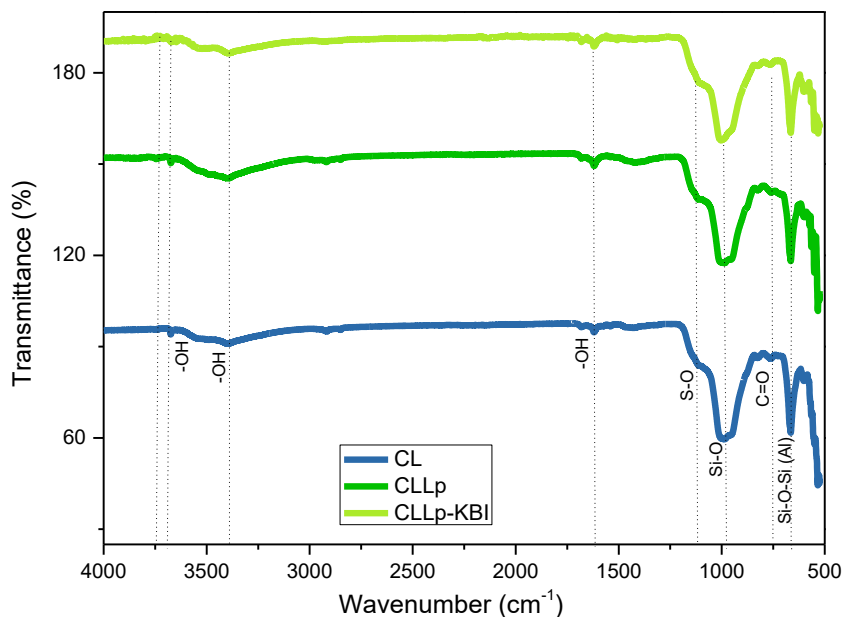


Figura 33. Espectro de FTIR de la referencia y del sistema híbrido.

3.4.7. Resultados de la fotoreducción de CO_2 del Sistema híbrido (CLLp /KBI)

A continuación, la **Figura 34a** muestra la evolución de la producción de ácido fórmico en los sistemas de referencia e híbrido a lo largo del tiempo. Se observa que la inmovilización de la perovskita sobre las arcillas mejoró notablemente su eficiencia en la generación de HCOOH , aumentando su actividad en 5.5 veces. Además, el sistema híbrido mantuvo un rendimiento estable en la reducción de CO_2 a HCOOH , logrando hasta 2.5 mmol en un lapso de 5 horas bajo exposición a luz visible.

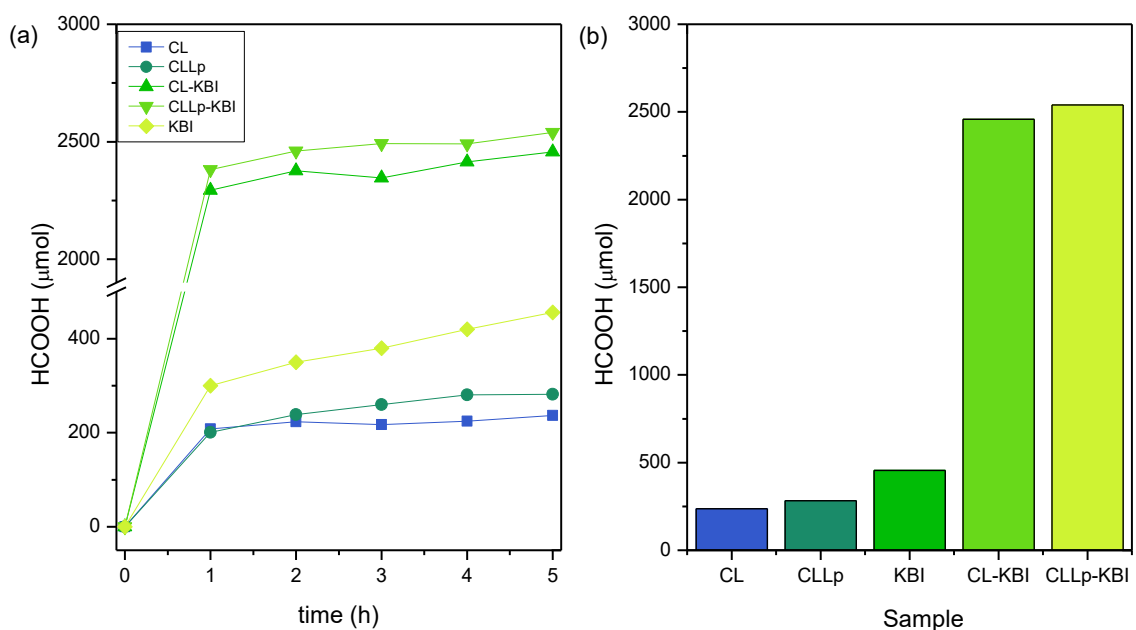


Figura 34. (a) Producción de ácido fórmico en función del tiempo para los sistemas de referencia e híbrido y (b) Comparación de la producción de HCOOH en las diferentes muestras después de 5 horas de reacción bajo luz visible.

Al comparar la eficiencia de las muestras CL-KBI y CLLp-KBI, se evidenció que ambas presentan un comportamiento similar en la producción de HCOOH (**Figura 34b**). Sin embargo, para explorar diferencias adicionales entre la perovskita soportada en arcillas y el sistema híbrido, se analizaron otros productos de reacción, cuyos resultados se muestran en la **Figura 35**. Ambas muestras produjeron ácido acético (6.5 μmol) y n-propanol en cantidades variables. Destaca que la producción de n-propanol, un compuesto de alto valor añadido, se incrementó al doble (hasta 1538 μmol en 5 h) tras la incorporación del alga en el sistema híbrido. Estos hallazgos refuerzan la idea de que el empleo de este material natural es altamente beneficioso para el diseño de hojas artificiales.

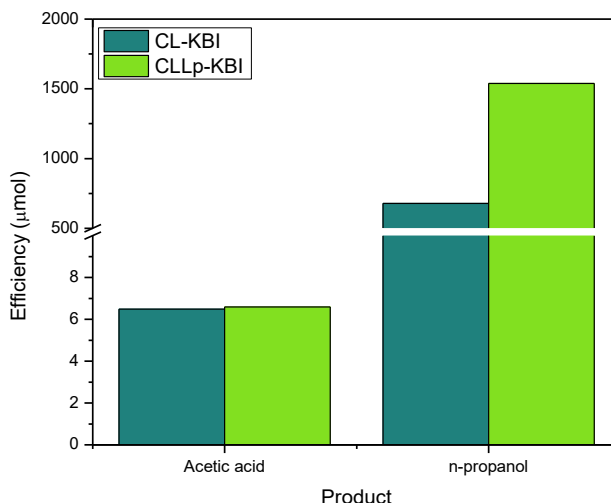


Figura 35. Producción de ácido acético y n-propanol como compuestos de alto valor añadido.

3.4.8 Mecanismo de reacción del Sistema híbrido (CLLp /KBI)

Con base en estos resultados, se propone el mecanismo ilustrado en el modelo de la **Figura 35**, en el cual la absorción de luz sigue dos rutas principales. La primera implica a la clorofila (Chl), que captura la luz y promueve la excitación de un electrón (e^-) desde su estado fundamental hasta un estado singlete excitado ($^1\text{Chl}^*$). Algunos de estos electrones pueden sufrir una conversión entre sistemas (ISC) hacia un estado triplete ($^3\text{Chl}^*$) [121]. En esta fase excitada, los electrones pueden ser transferidos a la banda de conducción (CB) del $\text{K}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$, facilitando la reducción del CO_2 .

Simultáneamente, la perovskita absorbe luz visible, generando pares electrón-hueco que también intervienen en la reducción de la molécula de CO_2 . Dentro de este proceso, el agua (H_2O) es oxidada por los huecos (h^+) de la banda de valencia (VB), lo que conduce a la formación de iones H^+ y OH^- . Estos iones reaccionan consecutivamente con los huecos en el $\text{K}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$, promoviendo la generación de radicales $\cdot\text{OH}$. Según los resultados obtenidos, se sugiere que se lleva a cabo un proceso de fotooxidación de los grupos hidroxilo en la

superficie, lo que representa una fuente adicional de electrones para la reducción de CO_2 [122].

Estos hallazgos indican que la mayor generación de cargas fotogeneradas en el sistema híbrido favoreció la producción de compuestos adicionales que requieren un mayor aporte de H^+/e^- , como los compuestos C_2 y C_3 , entre ellos CH_3COOH y $\text{CH}_3\text{H}_7\text{OH}$. Esta conclusión fue corroborada al comparar la eficiencia en la formación de compuestos C_3 entre las muestras CL-KBI y CLLp-KBI (**Figura34**).

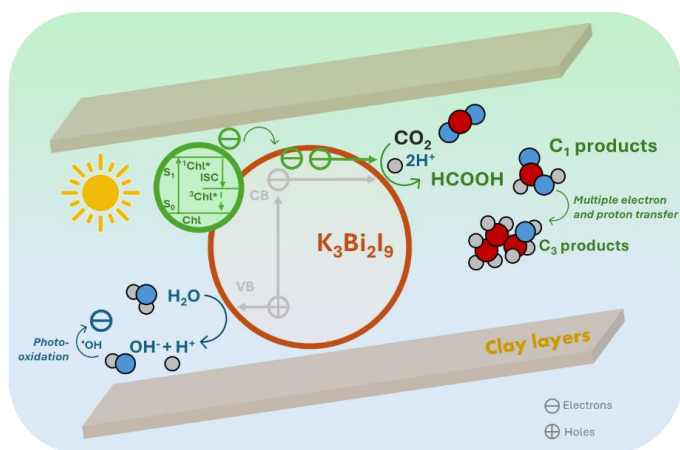


Figura 36. Mecanismo de fotoreducción de CO_2 en el sistema híbrido (arcilla-Lp/KBI).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo proporciona evidencia viable sobre la aplicación potencial de la biomasa de algas pardas (*Sargassum* sp. y *Lobophora* sp.) del Caribe mexicano como aditivo en materiales inorgánicos como el MOC y arcillas naturales dando lugar a la formación de biosoportes. Los biosoportes fueron impregnados con una tinta precursora de perovskita haluro de bismuto ($K_3Bi_2I_9$), libres de Plomo, generando sistemas híbridos fotocatalíticos para la reducción de CO_2 . Los resultados demostraron una correlación directa entre el porcentaje de algas incorporada y las características estructurales de los biosoportes obtenidos. Asimismo, esta investigación demuestra que la integración de algas pardas en soportes inorgánicos funcionalizados con perovskitas de haluro favorecen su eficiencia, mejorando su actividad fotocatalítica. Por tal motivo, estos sistemas híbridos representan una alternativa prometedora para la captura y fotoreducción de CO_2 , al mismo tiempo que contribuyen a mitigar la plaga de sargazo en el Caribe mexicano.

Los principales hallazgos de esta investigación fueron:

1. Los biosoportes presentan características estructurales y funcionales mejoradas en comparación con los materiales de referencia. Dichas características favorecieron el diseño y fabricación de sistemas híbridos sostenibles y de bajo costo para la fotosíntesis artificial.
2. La adición de un 5 % en peso de algas en los materiales inorgánicos permitió mantener tanto una alta eficiencia en la producción de $HCOOH$ como la estabilidad del sistema híbrido, evitando la formación de grietas y la saturación.
3. La adición de algas no afectó la cristalización de la fase 5 del biosoporte.
4. La presencia de algas pardas en el biosoporte promovió una microestructura más compacta, que tendió a cubrir la morfología en forma de aguja del MOC.
5. La resistencia a la compresión disminuyó tras la incorporación de *Lobophora* sp., lo cual se relacionó con un mayor área superficial y volumen de poro en el biosoporte.

6. El efecto mejorado de estos sistemas híbridos se atribuyó a una encapsulación adecuada de la perovskita en el soporte poroso y a la presencia de clorofila en las algas pardas, que actúa como donadora de electrones y mejora la absorción de luz, haciendo más eficiente la reducción de CO_2 .
7. Este efecto sinérgico favoreció la formación de productos C1 (HCOOH) y C3 [$(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{OH})$] en el orden de mmol, cuyas producciones se encuentran entre las más competitivas reportadas hasta el momento.

El presente trabajo sugiere diversas líneas de investigación y aplicación que podrían explorarse en el futuro. Una posible dirección consiste en escalar los sistemas híbridos hacia reactores de mayor volumen, con el propósito de evaluar su desempeño en condiciones más cercanas a escenarios industriales, así como considerar el uso de otros residuos vegetales abundantes en México como bagazo de agave, de café o de caña, que permitan diversificar los biosoportos y ampliar la propuesta tecnológica. También sería relevante profundizar en la optimización de los sistemas híbridos para que permitan la adsorción directa de CO_2 atmosférico, así como la mejora de los sistemas híbridos para elevar la producción de ácido fórmico. Tales avances, de concretarse, podrían dar lugar a iniciativas de innovación verde con potencial aplicación en los sectores energético, de la construcción y de la remediación ambiental. Otra perspectiva consiste en la vinculación social y profesional, donde esta propuesta podría integrarse a programas de economía circular para el manejo integral del sargazo en el Caribe mexicano, en colaboración con gobiernos locales, el sector hotelero y comunidades costeras, además de generar sinergias con la industria energética interesada en tecnologías de captura y conversión de CO_2 .

PRODUCTOS GENERADOS Y DIFUSIÓN DEL CONOCIMIENTO

Durante el transcurso de mi formación en la Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental tuve la oportunidad de participar activamente en múltiples espacios de divulgación científica, fortaleciendo mi desarrollo profesional y contribuyendo al avance del conocimiento en el área de materiales sustentables y aprovechamiento del sargazo. Particularmente, se publicó un artículo científico en febrero de 2025, en la revista *Sustainable Chemistry and Pharmacy* de Elsevier con un factor de impacto de 5.5

La referencia a dicho artículo es:

1. Mellado-Lira, E. A., Luévano-Hipólito, E., & Torres-Martínez, L. M. (2025). Brown algae: *Sargassum* sp. and *Lobophora* sp. incorporation in magnesium oxychloride cement. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 44, 101969.
- En mayo de 2024, presenté un cartel científico en el *Congreso Estatal de Ciencia en Materiales*, donde compartí los avances de mi investigación ante una comunidad académica local. Posteriormente, en agosto de ese mismo año, participé con una ponencia oral en el *Congreso Internacional de Materiales*, donde abordé soluciones a las limitaciones actuales de la fotocatalisis de CO₂, destacando el uso potencial de materiales derivados del sargazo. Esta experiencia representó un punto clave para la internacionalización de mi trabajo.
 - En octubre de 2024, obtuve el primer lugar en el *5.º Encuentro Científico y Tecnológico de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería Civil (ECTI-FIC)*, gracias a una presentación oral sobre el uso del sargazo como adsorbente de dióxido de carbono en cementos soresl.
 - Paralelamente, participé activamente en los *Seminarios Internos del Departamento de Ecomateriales y Energía*, donde expuse cada semestre, los avances de mis resultados de investigación recibiendo retroalimentación valiosa por parte de mis compañeros y profesores.
 - Además, en el *Seminario General de Alumnos de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil*, compartí una síntesis de mi proyecto, sus aplicaciones ambientales

y el impacto social que puede tener el aprovechamiento integral del sargazo. Esta intervención cerró con orgullo un ciclo lleno de aprendizajes, logros académicos y crecimiento personal.

- Adicionalmente se encuentra en proceso de revisión un segundo artículo en la revista JEC composite magazine.
- Finalmente, se encuentra en proceso de redacción un tercer artículo como resultado de mi estancia de investigación en el Instituto Nacional del Carbón (INCAR) en Oviedo, España. El objetivo de esta estancia fue estudiar en profundidad las propiedades fisicoquímicas y estructurales de biocarbones activados a partir de sargazo, así como su aplicación como materiales funcionales en procesos de captura de CO₂ y remoción de contaminantes emergentes. Esta experiencia internacional fortaleció mis capacidades técnicas en caracterización y me permitió colaborar con especialistas en el área de materiales porosos y sostenibilidad ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

1. Srivastav, A. L., Dubey, A. K., Kumar, A., Narang, S. K., & Khan, M. A. (Eds.). (2022). *Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence*. Elsevier.
2. Ahmed Ali, K., Ahmad, (2020). Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector. *Sustainability*, 12(18), 7427. <https://doi.org/10.3390/su12187427>
3. Climate Nasa (2025). Dióxido de carbono. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>
4. Barrios, C. E., Albiter, E. (2015). La fotosíntesis artificial, una alternativa para la producción de combustibles. *Mundo nano* 8(15), 6-21. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.15.53813>
5. Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234-240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
6. Maile, O. I., Tesfagiorgis, H. B., & Muzenda, E. (2015). Factors influencing chemical absorption of CO₂ and H₂S in biogas purification: a review. In *World congress on engineering and computer science, San Francisco, USA*.
7. Mulligan J., et al (2023). 6 Ways to Remove Carbon Pollution from the Atmosphere. *World Resources Institute* (Diagrama) Recuperado de: <https://www.wri.org/insights/6-ways-remove-carbon-pollution-sky>
8. Nie, L., Mu, Y., Jin, J., Chen, J., & Mi, J. (2018). Recent developments and consideration issues in solid adsorbents for CO₂ capture from flue gas. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(11), 2303-2317. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.07.012>
9. Ren, F., & Liu, W. (2023). Review of CO₂ Adsorption Materials and Utilization Technology. *Catalysts*, 13(8), 1176. <https://doi.org/10.3390/catal13081176>
10. Duany-Timosthe, (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. *Tecnología Química*, 42(1), 94-113. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100094&lng=es&tlng=es.

11. Tejada-Tovar, C. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123.
12. Patrón Prado, M. (2012). Factibilidad del uso de un sistema de flujo continuo para la remoción de iones de cadmio y cobre de soluciones acuosas utilizando el alga sargassum sinicola.
13. Gao, X., Yang, S., Hu, L., Cai, S., Wu, L., & Kawi, S. (2022). Carbonaceous materials as adsorbents for CO₂ capture: synthesis and modification. *Carbon Capture Science & Technology*, 3, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100039>
14. Niu, M., Yao, Y., Zi, M., Dong, P., & Chen, D. (2024). Clay mineral mediated dynamics of CO₂ hydrate formation and dissociation: Experimental insights for carbon sequestration. *Energy*, 311, 133375. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133375>
15. Kundu, S., Khandaker, T., Anik, M. A. A. M., Hasan, M. K., Dhar, P. K., Dutta, S. K., ... & Hossain, M. S. (2024). A comprehensive review of enhanced CO₂ capture using activated carbon derived from biomass feedstock. *RSC advances*, 14(40), 29693-29736. <https://doi.org/10.1039/d4ra04537h>
16. Herrera Monroy, S. (2015). *Sargazo (Sargassum spp) como sustrato agrícola* (Master's thesis)
17. Chacaltana Torres, G. R. (2018). Uso de borra de café como bioadsorbente para la remoción de cadmio y plomo disuelto en el agua del río Añasmayo sector la perla-Huaral, 2018.
18. López-Miranda, J. L., Silva, R., Molina, G. A., Esparza, R., Hernandez-Martinez, (2020). Evaluation of a dynamic bioremediation system for the removal of metal ions and toxic dyes using Sargassum Spp. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 899. <https://doi.org/10.3390/jmse8110899>
19. Benavides-Paredes, J.A.(2018). “*Obtención y caracterización de biosorbentes a base de corteza de eucalipto, para la remoción*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).
20. Valladares-Cisneros, M. G., Valerio-Cárdenas, C., de la Cruz-Burelo, P., & Melgoza-Alemán, R. M. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55-73

21. García-García, A. M. E., Cabrera-Becerril, E., Núñez-Resendiz, M. L., Dreckmann, K. M., & Sentíes, A. (2021). *Actualización taxonómica de las algas pardas (Phaeophyceae, Ochrophyta) marinas bentónicas del Atlántico mexicano*. *Acta botánica mexicana*, (128). <https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1968>
22. Jones, I., Smol, J. P., & Wetzel, R. G. (2024). Wetzel's limnology: lake and river ecosystems. Chapter 17. Pages 463-510.
23. SEMARNAT-INECC (2021). Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México.
24. BioPlaster Research Inc. (2023). *Sargazo en el Mar Caribe* . BioPlaster Research Inc. Recuperado de <https://www.bioplaster-research.com/bio/sargazo-en-el-mar-caribe>
25. Torres Beristain, B. (2019). El sargazo en las costas mexicanas. Dirección de comunicación de la ciencia. Universidad Veracruzana.
26. Caballero Vázquez. J.A., Acosta González.G., Hernández Zepeda. C. El sargazo, un fenómeno complejo. Revista ciencia: México ante el sargazo. volumen 71. número 4. Pags 14-19. ISSN 1405-6550
27. León, C. (2020). El sargazo a escena. *Salud pública de méxico*, 61, 701-703.
28. Ortegón-Aznar, I., (2020). Arribazón de sargazo en la península de Yucatán: ¿Problema local, regional o mundial?. *Bioagrobiociencias*, 13(2).
29. Oliveira, D. A., Pessoa, I. D. L., Cesarino, L. G. S., Vallerini, M. Y., & SILVA JUNIOR, V. A. (2017). Desenvolvimento de matriz polimérica de quitosana e alginato com imobilização de íons ferro (II) para degradação do corante tipo azóico vermelho de metila via processo foto-fenton. [10.13140/RG.2.2.26866.56007](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26866.56007)
30. Nava Jiménez (2020) El sargazo del mar Caribe mexicano. Revista ciencia: México ante el sargazo. volumen 71. Pags 58-61. ISSN 1405-6550
31. Benaisa, S., Arhoun, B., El Mail, R., & Rodriguez-Maroto, J. M. (2018). Potential of brown algae biomass as new biosorbent of Iron: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study. *Proteins*, 3, 18.
32. Singh, R. (2014). *Membrane technology and engineering for water purification: application, systems design and operation*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63362-0.00002-1>

33. Paraguay-Delgado, F., Carreño-Gallardo, C., Estrada-Guel, I., Zabala-Arceo, A., Martinez-Rodriguez, H. A., & Lardizábal-Gutierrez, D. (2020). Pelagic Sargassum spp. capture CO₂ and produce calcite. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 25794-25800. [10.1007/s11356-020-08969-w](https://doi.org/10.1007/s11356-020-08969-w)
34. S Benaïsa, B Arhoun, R El Mail, JM Rodriguez-Maroto. (2018). Potential of brown algae biomass as new biosorbent of Iron: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study. *Journal of Materials and Environmental Sciences* 9(7), 2131-2141.
35. A Saravanan, V Brindha, E Manivannan, S Krishnan. (2010). Kinetics and isotherm studies of mercury and iron biosorption using Sargassum sp. *International Journal of Chemical Sciences and Applications* 1(2), 50-60.
36. S Huang, G Lin. (2015). Biosorption of Hg(II) and Cu(II) by biomass of dried Sargassum fusiforme in aquatic solution. *Journal of Environmental Health Science & Engineering* 13(21), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0180-4>
37. A Esmaeili, B Saremnia, M Kalantari. (2015). Removal of mercury(II) from aqueous solutions by biosorption on the biomass of Sargassum glaucescens and Gracilaria corticate. *Arabian Journal of Chemistry* 8(4), 506-511. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2012.01.008>
38. GS Khorramabadi, RDC Soltani. (2008). Evaluation of the marine algae Gracilaria salicornia and Sargassum sp. for the biosorption of Cr (VI) from aqueous solutions. *Journal of Applied Sciences* 8, 2163-2167. <https://doi.org/10.3923/jas.2008.2163.2167>
39. Y González Bermúdez, IL Rodríguez Rico, E Guibal, M Calero de Hocés, M^Á Martín-Lara. (2012). Biosorption of hexavalent chromium from aqueous solution by Sargassum muticum brown alga. Application of statistical design for process optimization. *Chemical Engineering Journal* 183, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.022>
40. A Esmaeili, S Soufi, A Rustaiyan, S Safaiyan, S Mirian, G Fallahe, N Moazami. (2007). Biosorption of Copper, Cobalt and Nickel by Marine Brown Alga Sargassum sp. In fixed-bed column. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 10(1).3919-3922. [10.3923/pjbs.2007.3919.3922](https://doi.org/10.3923/pjbs.2007.3919.3922)
41. F Soleymani, MH Khani, H Pahlavanzadeh, M Manteghian. (2015). Study of cobalt (II) biosorption on Sargassum sp. by experimental design methodology. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12, 1907–1922. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0739-0>

42. E Valdman, SGF Leite. (2000). Biosorption of Cd, Zn and Cu by *Sargassum* sp. waste biomass. *Bioprocess Engineering* 22, 171–173. <https://doi.org/10.1007/PL00009109>
43. L Surayya, E Putri. (2016). Biosorption of Lead using Macroalgae *Eucheuma spinosum*, *Padina minor* and *Sargassum crassifolium* in Aqueous Solution. *Asian Journal of Applied Sciences* 4(2), 520-525.
44. A Verma, S Kumar, C Balomajumder, S Kumar. (2018). Efficacy of *Sargassum filipendula* for the removal of Pb²⁺, Cd²⁺ and Ni²⁺ ions from aqueous solution: a comparative study. *Desalination and Water Treatment* 129, 216–226. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22788>
45. K Vijayaraghavan, TVN Padmesh, K Palanivelu, M Velan. (2006). Biosorption of nickel(II) ions onto *Sargassum wightii*: Application of two-parameter and three-parameter isotherm models. *Journal of Hazardous Materials* 133(1–3), 304-308. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.016>
46. CA Henriques, AC Augusto da Costa, MM dos Reis, AL Hemerly Costa, AS Luna. (2011). Batch and fixed-bed column biosorption of manganese ion by *Sargassum filipendula*. *Electronic Journal of Biotechnology* 14(5), 1-15. <https://doi.org/10.2225/vol14-issue5-fulltext-8>
47. R Tabaraki, E Heidarizadi. (2017). Simultaneous multidye biosorption by chemically modified *Sargassum glaucescens*: Doehlert optimization and kinetic, equilibrium, and thermodynamic study in ternary system. *Separation Science and Technology* 52(4), 583-595. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1261898>
48. M Kousha, E Daneshvar, H Dopeikar, D Taghavi, A Bhatnagar. (2012). Box–Behnken design optimization of Acid Black 1 dye biosorption by different brown macroalgae. *Chemical Engineering Journal* 179, 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.073>
49. H Omar, A El-Gendy, (2018). Bioremoval of toxic dye by using different marine macroalgae, *Turkish Journal of Botany* 42, 15-27. <https://doi.org/10.3906/bot-1703-4>
50. E Rubin, P Rodriguez, R Herrero, J Cremades, I Barbara, ME Sastre de Vicente. (2005). Removal of Methylene Blue from aqueous solutions using as biosorbent *Sargassum muticum*: an invasive macroalga in Europe. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 80(3), 291-298. <https://doi.org/10.1002/jctb.1192>

51. G Rocha de Freitas, MGA Vieira, MGC da Silva. (2020). Characterization and biosorption of silver by biomass waste from the alginate industry. *Journal of Cleaner Production* 271,122588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122588>
52. N Ai, S Lou, F Lou, C Xu, Q Wang, G Zeng. (2021). Facile synthesis of macroalgae-derived graphene adsorbents for efficient CO₂ capture. *Process Safety and Environmental Protection* 148,1048-1059. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.014>
53. S Ding, Y Liu. (2020). Adsorption of CO₂ from flue gas by novel seaweed-based KOH-activated porous biochars. *Fuel* 260, 116382. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116382>
54. G Zeng, S Lou, H Ying, X Wu, X Dou, N Ai, J Wang. (2018). Preparation of Microporous Carbon from *Sargassum horneri* by Hydrothermal Carbonization and KOH Activation for CO₂ Capture. *Journal of Chemistry* 2018 <https://doi.org/10.1155/2018/4319149>
55. CINVESTAV, Publicaciones (2022). Analizan propiedades del sargazo para su manejo adecuado y aprovechamiento.
56. Hernández-Carmona, G., Rodríguez-Montesinos, Y. E., Arvizu-Higuera, D. L., Reyes-Tisnado, R., Murillo-Álvarez, J. I., & Muñoz-Ochoa, M. (2012). Avances tecnológicos en la producción de alginatos en México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(2), 155-168. ISSN 1405-7743 FI-UNAM
57. López-Miranda, J. L., Silva, R., Molina, G. A., Esparza, R., Hernandez-Martinez, (2020). Evaluation of a dynamic bioremediation system for the removal of metal ions and toxic dyes using *Sargassum* Spp. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 899. <https://doi.org/10.3390/jmse8110899>
58. Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., ... & van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8, e8667. DOI: [10.7717/peerj.8667](https://doi.org/10.7717/peerj.8667)
59. K. Bilba, C. Onésippe Potiron, M.-A. Arsène. (2023). Invasive biomass algae valorization: Assessment of the viability of *Sargassum* seaweed as pozzolanic material, *Journal of Environmental Management* 342, 118056. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.118056](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118056)

60. H. Affan, K. Touati, M.-H. Benzaama, D. Chateigner, Y. E. Mendili. (2023). Earth-Based Building Incorporating *Sargassum muticum* Seaweed: Mechanical and Hygrothermal Performances, *Buildings* 13(4), 932. <https://doi.org/10.3390/buildings13040932>
61. S. Talibi, J. Page, C. Djelal, L. Saâdi. (2023). Mechanical Performance of Compacted Earth Bricks (CEB) Incorporated by Raw and Treated Red Algae Fibers “*Gelidium Sesquipedale*”, *International Conference on Bio-Based Building Materials* 45. [10.1007/978-3-031-33465-8_41](https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_41)
62. A. Graich, Y E. Haloui, H. Rchid, R. Nmila, M. Sinti, I. Mrani, M. Monkade, M. Khaidar, A. Zradba. (2024). Use of *Sargassum muticum* algae as binder strengthening for raw earth mortar, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 28(1), 95-107. [10.1080/19648189.2023.2205487](https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2205487)
63. T. Yalçın, A. Alemdar, Ö. I. Ece, N. Güngör. (2002). The viscosity and zeta potential of bentonite dispersions in presence of anionic surfactants, *Materials Letters* 57(2) 420-424. [10.1016/S0167-577X\(02\)00803-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00803-0)
64. Quintero Lizárraga, O. L. (2023). *Fotoreducción de CO2 a combustibles renovables y sustentables mediante el uso de perovskitas* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
65. Shyamal, S., & Pradhan, N. (2020). Halide perovskite nanocrystal photocatalysts for CO2 reduction: successes and challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 11(16), 6921-6934. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c00191>
66. Li, Z., Han, B., Bai, W., Wei, G., Li, X., Qi, J., Zhu, L. (2023). Photocatalytic CO2RR for gas fuel production: Opportunities and challenges. *Separation and Purification Technology*, 124528.
67. Luévano-Hipólito, E., & Torres-Martínez, L. M. (2022). CO2 photoreduction with H2O to C1 and C2 products over perovskite films of alkaline niobates ANbO3 (A= Li, Na, K). *Fuel*, 320, 123934. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123934>
68. Li, Z., Han, B., Bai, W., Wei, G., Li, X., Qi, J., ... & Zhu, L. (2023). Photocatalytic CO2RR for gas fuel production: Opportunities and challenges. *Separation and Purification Technology*, 324, 124528. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124528>
69. Garay-Rodríguez, L. F., Luévano-Hipólito, E., & Torres-Martínez, L. M. (2023). Renewable formic acid production from CO2 reduction using green ZnO

nanoarchitectures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 161, 107458. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107458>

70. K. Li, Y. Wang, X. Wang, X. Zhang, J. Zhang, H. Xie, A. Zhang. (2021). Superhydrophobic magnesium oxychloride cement based composites with integral stability and recyclability, *Cement and Concrete Composites* 118, 103973. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103973>

71. Qu, M., Qin, G., Du, A., Fan, J., & Sun, Q. (2019). B80 fullerene: a promising metal-free photocatalyst for efficient conversion of CO₂ to HCOOH. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(39), 24193-24199. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b07562>

72. Fu, J., Jiang, K., Qiu, X., Yu, J., & Liu, M. (2020). Product selectivity of photocatalytic CO₂ reduction reactions. *Materials Today*, 32, 222-243. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.009>

73. Ye, C., Dattila, F., Chen, X., López, N., & Koper, M. T. (2023). Influence of Cations on HCOOH and CO Formation during CO₂ Reduction on a PdMLPt (111) Electrode. *Journal of the American Chemical Society*, 145(36), 19601-19610. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c03786>

74. He, J. N., Ding, X., Liu, Q., & Gao, Y. (2023). Highly selective reduction of CO₂ to HCOOH by a ZnO/SnO₂ electrocatalyst with heterogeneous interfaces. *New Journal of Chemistry*, 47(26), 12075-12079. <https://doi.org/10.1039/D3NJ01660A>

75. Cao, Y., Zhang, C., Wang, W., Liu, Y., Tao, Y., Fan, J., ... & Li, G. (2024). Binary junctions enhance electron storage and potential difference for photo-assisted electrocatalytic CO₂ reduction to HCOOH. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 349, 123867. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.123867>

76. Mubarak, S., Dhamodharan, D., Byun, H. S., Pattanayak, D. K., & Arya, S. B. (2022). Efficient photoelectrocatalytic conversion of CO₂ to formic acid using Ag-TiO₂ nanoparticles formed on the surface of nanoporous structured Ti foil. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 113, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.06.001>

77. Mardini, N., & Bicer, Y. (2021). Direct synthesis of formic acid as hydrogen carrier from CO₂ for cleaner power generation through direct formic acid fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(24), 13050-13060.

78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00989-1>
79. Chen, X., Liu, Y., & Wu, J. (2020). Sustainable production of formic acid from biomass and carbon dioxide. *Molecular Catalysis*, 483, 110716. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2019.110716>
80. Pan, H., & Heagy, M. D. (2020). Photons to formate: a review on photocatalytic reduction of CO₂ to formic acid. *Nanomaterials*, 10(12), 2422. <https://doi.org/10.3390/nano10122422>
81. Achour, M., Álvarez-Hernández, D., Ruiz-López, E., Megías-Sayago, C., Ammari, F., Ivanova, S., & Centeno, M. Á. (2023). Formic acid as renewable reagent and product in biomass upgrading. *Tetrahedron Green Chem*, 2, 100020. <https://doi.org/10.1016/j.tgchem.2023.100020>
82. Rodríguez-Alfaro, L. F., Torres-Martínez, L. M., Treviño-Garza, M. Z., Vázquez-Guillén, J. M., Rodríguez-Padilla, C., & Luévano-Hipólito, E. (2024). Design and fabrication of photocatalytic magnesium oxychloride cement with improved moisture stability: A step towards sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 414, 134804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134804>
83. Salas-Espinosa, I., Torres-Martínez, L. M., & Luévano-Hipólito, E. (2024). Photoactive self-cleaning zinc oxychloride coatings. *Results in Surfaces and Interfaces*, 17, 100350. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100350>
84. Kar T., González-Escobar C., Ramos-Hernández J. J., Casales-Díaz M., Flores-Rodríguez M. F., Pérez R., Kumar Kesarla M., (2024). A comprehensive analysis of Sargassum natans-derived inorganic carbon composite for electrochemical charge storage. *J. Energy Storage* 82, 110600. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110600>
85. Dhanalakshmi V., Jeyanthi Rebecca L. (2012). Estimation of Trace Elements from Seaweeds using SEM. *IJBB* 3(1), 27-31.
86. Rosas-Díaz, F. ., Martínez Arreguin, A., Hernández, JC ., Juárez-Alvarado, CA ., Galindo-Rodríguez, SA., & García-Hernández, DG (2025). Estudio de compatibilidad de agregado a base de sargazo en matriz cementosa a base de cemento Portland. *Revista De La Construcción. Revista de Construcción* , 24 (1), 25–42. <https://doi.org/10.7764/RDLC.24.1.25>

87. Antonio-Hernández, C., Pacio-Castillo, M., Pacio-Castillo, A. *et al.* Aprovechamiento del alga *Sargassum* para la próxima generación de supercondensadores: un enfoque sostenible para soluciones avanzadas de almacenamiento de energía. *J Mater Sci* **60** , 14024–14037 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10853-025-11204-x>
88. Kleinübing, S. J., Guibal, E., & da Silva, M. G. C. (2009). Characterization of *Sargassum* sp. from Brazil and Evaluation of Cu²⁺ and Ni²⁺ Biosorption. *Advanced Materials Research*, 71, 589-592. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.71-73.589>
89. Suzuki, P. Y. R., Munaro, M. T., Triques, C. C., Kleinübing, S. J., Klen, M. R. F., de Matos Jorge, L. M., & Bergamasco, R. (2017). Biosorption of binary heavy metal systems: phenomenological mathematical modeling. *Chemical Engineering Journal*, 313, 364-373. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.082>
90. Yang W., Liu Z., Xu W., Liu Y. (2018). Removal of elemental mercury from flue gas using sargassum chars modified by NH₄Br reagent. *Fuel* 214, 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.004>
91. Tukaram Bai M., Venkateswarlu P. (2018). Fixed bed and batch studies on biosorption of lead using *Sargassum Tenerrimum* powder: Characterization, Kinetics and Thermodynamics. *Mater. Today*. 5(9), 18024-18037. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.136>
92. Luévano-Hipólito, E., Fabela-Cedillo, M. G., Torres-Martínez, L. M., & Zarazúa-Morín, M. E. (2023). Solar-driven CO₂ reduction using modified earth-abundant ilmenite catalysts. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17426>
93. Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J., Chablé-Villacís, R., Olguín-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M., Canché-Escamilla, G (2020). Presence of polyphenols complex aromatic “Lignin” in *Sargassum* spp. from Mexican Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jmse9010006>
94. Zhou, W., Ye, Q., Cao, J., Shi, S. Q., & Li, J. (2022). Performance improvement of magnesium oxychloride cement via nanoparticles-enhanced organic–inorganic hybrid network. *Construction and Building Materials*, 343, 128096. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128096>

95. Woo, S., Jung, H., & Yoon, Y. (2023). Real-Time UV/VIS Spectroscopy to Observe Photocatalytic Degradation. *Catalysts*, 13(4), 683. <https://doi.org/10.3390/catal13040683>
96. L. F. Rodríguez-Alfaro, L. M. Torres-Martínez, M. Z. Treviño-Garza, J. M. Vázquez-Guillén, C. Rodríguez-Padilla, E. Luévano-Hipólito. (2024). Design and fabrication of photocatalytic magnesium oxychloride cement with improved moisture stability: A step towards sustainable construction, *Construction and Building Materials* 414, 134804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134804>
97. I. Rasheed, U. Khan, A. Tabassum, R. Aliya. (2018). Quantitative evaluation and ft-ir analysis of alginate from brown seaweeds of Karachi Coast, *Pakistan Journal of Marine Sciences* 27(1).39-43.
98. Flores, J. J. A., Vera, J. V. A., Rodriguez, M. L. A., Quinones, J. G. R., Valencia, J. E., Martínez, S. J. G., ... & Zarraga, R. A. (2022). Kinetic, thermodynamic, FT-IR, and primary constitution analysis of Sargassum spp from Mexico: Potential for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30107-30127. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.051>
99. S. Coseri, G. Biliuta, L. F. Zemljič, J. S. Srndovic, P. T. Larsson, S. Strnad, T. Kreže, A. Naderic, T. Lindström. (2015). One-shot carboxylation of microcrystalline cellulose in the presence of nitroxyl radicals and sodium periodate, *RSC Advances* 5, 85889-85897. <https://doi.org/10.1039/C5RA16183E>
100. Gaysinski, M., Ortalo-Magné, A., Thomas, O.P., Culioli, G. (2015). Extraction, Purification, and NMR Analysis of Terpenes from Brown Algae. In: Stengel, D., Connan, S. (eds) *Natural Products From Marine Algae. Methods in Molecular Biology*, vol 1308. Humana Press, New York, NY. [10.1007/978-1-4939-2684-8_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2684-8_13)
101. S. Talibi, J. Page, C. Djelal, L. Saâdi. (2023). Mechanical Performance of Compacted Earth Bricks (CEB) Incorporated by Raw and Treated Red Algae Fibers “Gelidium Sesquipedale”, *International Conference on Bio-Based Building Materials* 45. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_41
102. G. P. Lyra, A.L. Colombo, A.J.F. Peres Duran, I. M. da Silva Parente, C. Bueno, J.A. Rossignolo. (2024). The Use of Sargassum spp. Ashes Like a Raw Material for Mortar Production: Composite Performance and Environmental Outlook, *Materials* 17(8), 1785. <https://doi.org/10.3390/ma17081785>

103. A. Heidari, F. Ghaffari, H. Ahmadvand. (2015). Properties of self compacting concrete incorporating alginate and nanosilica, *Asian Journal of Civil Engineering* 16(1), 1-11.
104. Chabi M., Mortadi A., Moznine R. E., Monkade M., Zaim S., Nmila R., Rchid, H., (2024). A new approach to investigate the hydration process and the effect of algae powder on the strength properties of cement paste. *Aust. J. Mech. Eng.* 22(1), 123-132. <https://doi.org/10.1080/14484846.2022.2066855>
105. Shao H., Lin Y., Li Z., Tang S., Ge G. (2023). Study the impedance spectroscopy of early-age cement paste hydration process using Electrodeless impedance analyzer (EIA). *Constr. Build. Mater.* 368, 130439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130439>
106. Bortoletto, M., Sanches, A. O., Santos, J. A., Da Silva, R. G., Tashima, M. M., Payá, J., ... & Akasaki, J. L. (2023). New insights on understanding the Portland cement hydration using electrical impedance spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 407, 133566. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133566>
107. Li, K., Wang, Y., Yao, N., & Zhang, A. (2020). Recent progress of magnesium oxychloride cement: Manufacture, curing, structure and performance. *Construction and Building Materials*, 255, 119381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119381>
108. Sevcik R., Sasek P., Viani A. (2018). Physical and nanomechanical properties of the synthetic anhydrous crystalline CaCO₃ polymorphs: vaterite, aragonite and calcite. *J. Mater. Sci.* 53, 4022-4033. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1884-x>
109. O. L. Quintero-Lizárraga, E. Luévano-Hipólito, L. I. Ibarra-Rodríguez, L. M. Torres-Martínez. (2023). Layered-Defect Perovskite K₃Bi₂X₉ (X = I, Br, and Cl) Thin Films for CO₂ Photoreduction: An Analysis of Their Pseudocatalytic Behavior, *Sustainability* 15(24),16835. <https://doi.org/10.3390/su152416835>
110. Preparation of Seaweed Nanopowder Particles Using Planetary Ball Milling and Their Effects on Some Secondary Metabolites in Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Seedlings, A. A. Mohamed, M. Y. Sameeh, H. S. El-Beltagi, istry Department, Al-Leith University College, Umm Al-Qura University, Makkah P.O. Box 21955, *Life* 13(1) (2023) 39. <https://doi.org/10.3390/life13010039>
111. M. Hariram, V. Ganesan, S. Muthuramkumar, S. Vivekanandhan. (2021). Functionalization of kaolin clay with silver nanoparticles by *Murraya koenigii* fruit extract-

mediated bioreduction process for antimicrobial applications, J. Aust. Ceram. 57, 505-513.
<https://doi.org/10.1007/s41779-020-00545-2>

112. M. Yusprianto, T. A. Zaharahscopus, I. H. Silalahi. (2021). Bandgap Energy of TiO₂/M-Chlorophyll Material (M=Cu²⁺, Fe³⁺), J. Kim. Sains Apl. 4, 24.
<https://doi.org/10.14710/jksa.24.4.126-135>

113. Leiger, K., Linnanto, J. M., & Freiberg, A. (2020). Establishment of the Q y Absorption Spectrum of Chlorophyll a Extending to Near-Infrared. *Molecules*, 25(17), 3796. DOI:[10.3390/molecules25173796](https://doi.org/10.3390/molecules25173796)

114. Saito, K., Suzuki, T., & Ishikita, H. (2018). Absorption-energy calculations of chlorophyll a and b with an explicit solvent model. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 358, 422-431.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.10.003>

115. C. Worathitanon, K. Jangyubol, P. Ruengrung, W. Donphai, W. Klysubun, N. Chanlek, P. Prasitchoke, M. Chareonpanich. (2019). High performance visible-light responsive Chl-Cu/ZnO catalysts for photodegradation of rhodamine B, Appl. Catal. B 241, 359-366. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.09.048>

116. S. Louati, S. Baklouti, B. Samet. (2016). Geopolymers Based on Phosphoric Acid and Illito-Kaolinitic Clay, Adv. Mater. Sci. Eng. 1-7. <https://doi.org/10.1155/2016/2359759>

117. A. G. Chetverikova, O. N. Kanygina, V. N. Makarov, V. L. Berdinskiy, M. M. Seregin. (2022). Thermostimulated crystal structure transformation of the polymineral clay submicron particle, Cerâmica 68, 441-449. <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683883346>

118. J. Li, S. Zhang, Q. Wang, W. Ni, K. Li, P. Fu, W. Hu, Z. Li. (2020). Feasibility of using fly ash–slag-based binder for mine backfilling and its associated leaching risks, J. Hazard. Mater. 400, 123191. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123191>

119. L. B. López-Sosa, J. J. Alvarado-Flores, J. C. Corral-Huacuz, A. Aguilera-Mandujano, R. E. Rodríguez-Martínez, S. J. Guevara-Martínez, J. V. Alcaraz-Vera, J. G. Rutiaga-Quíñones, J. Zárate-Medina, M. L. Ávalos-Rodríguez, M. Morales-Máximo. (2020). A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic Sargassum spp. as a Solid Biofuel Energy Source, Appl. Sci. 10(23), 8706. <https://doi.org/10.3390/app10238706>

120. N. Abdelwahab, W. Rabie, F. Mohamed. (2023). Fabrication and characterization of novel biocomposite based on Sargassum vulgare for controlling sugar beet root diseases, Chem. Biol. Technol. 10,52. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00418-3>
121. S. Kreft, R. Schoch, J. Schneidewind, J. Rabeah, E. V. Kondratenko, V. A. Kondratenko, H. Junge, M. Bauer, S. Wohlrab, M. Beller. (2019). Improving Selectivity and Activity of CO₂ Reduction Photocatalysts with Oxygen, Chem 5(7),1818-1833. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2019.04.006>
122. T. Phongamwong, M. Chareonpanich, J. Limtrakul. (2015). Role of chlorophyll in Spirulina on photocatalytic activity of CO₂ reduction under visible light over modified N-doped TiO₂ photocatalysts, Appl. Catal. B 168–169,114-124. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.12.022>
123. Villaquirán-Caicedo, M. A., Rodríguez, E. D., & Mejía-De Gutiérrez, R. (2015). Microstructure assessment of metakaolin based-geopolymers produced with alternative silica sources exposed to high temperatures. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(1), 113-122.
124. Mahrous, M. A., Abdelghany, M. A., Trindade, A. C. C., Aboukhatwa, M., Kriven, W. M., & Jasiuk, I. M. (2024). Investigating irradiation effects on metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 437, 136837. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136837>

ANEXOS

Adicional al trabajo presentado, se realizaron pruebas con otros dos soportes inorgánicos (ZOC y GP), con la finalidad de explorar su capacidad de acoplamiento con las algas pardas para la obtención de sistemas híbridos y evaluar su eficiencia en la fotoreducción de CO₂. En este apartado se presentan los resultados obtenidos de dichos soportes.

A. Evaluación exploratoria de soportes ZOC.

A1 Caracterización morfológica del sistema híbrido (ZOC-alga)

En la **Figura A1** se observan las micrografías de los soportes con ZOC el cual presentó una estructura porosa con morfología rugosa, mientras que el biosoporte (ZOC/5% Lp) y el sistema híbrido (biosoporte/fotocatalizador) presentan también una estructura porosa, pero con la superficie más compacta.

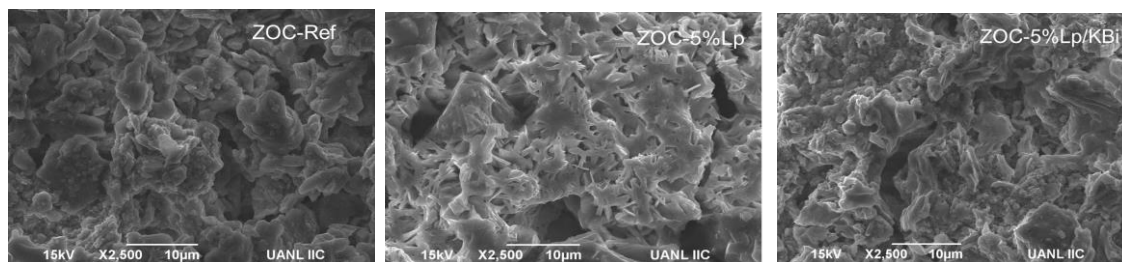


Figura A1 Micrografías de ZOC de referencia y de los biosoporte: ZOC-5%Lp, y sistema híbrido ZOC-5%Lp/KBI.

A2 Espectroscopía de Infrarrojo de los biosoportes

Se analizaron los sistemas híbridos mediante la técnica de espectroscopía de infrarrojo por transmitancia de Fourier. En la **Figura A2** se presentan los espectros de infrarrojo de las muestras ZOC y del biosoporte en dónde se identificaron diversas bandas asociadas con distintos grupos funcionales. Por ejemplo, la banda de OH es característica de los grupos alginatos, cómo se mencionó anteriormente. Otras bandas identificadas fueron la de celulosa y otros compuestos orgánicos presentes en el sargazo, tales como: grupos hidroxilo, carbonilo, amino, sulfato, quitosano. Dichos grupos funcionales desempeñan un papel importante en las interacciones químicas y biológicas de las algas pardas.

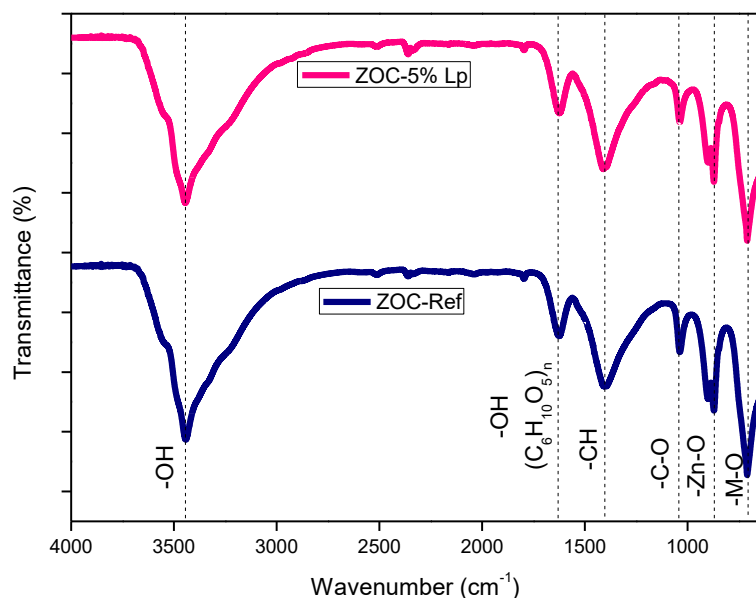


Figura A2. Espectros FTIR de ZOC y del biosoporte (ZOC- 5%Lp).

A3 Espectroscopia UV-Visible

Los ZOC son estructuras versátiles a las que se les puede agregar diversos compuestos para mejorar su eficiencia y sus propiedades texturales dependiendo el uso

que se le vaya a otorgar, dentro de sus aplicaciones potenciales destacan: la purificación del aire, el agua y la captura de CO₂ mediante procesos fotocatalíticos debido a su capacidad de absorción. Sin embargo, para mejorar la eficiencia fotocatalítica es necesaria la impregnación de fotocatalizadores como las perovskitas de haluro de bismuto.

En la **Figura A3** se observa que la adición de algas pardas en los biosoportes mejoró la absorción de luz en la región visible, específicamente entre los 650 y 700 nm. Este efecto se atribuyó a la presencia de clorofila a en las muestras tal como se demostró en las muestras de MOC y arcillas explicadas con anterioridad.

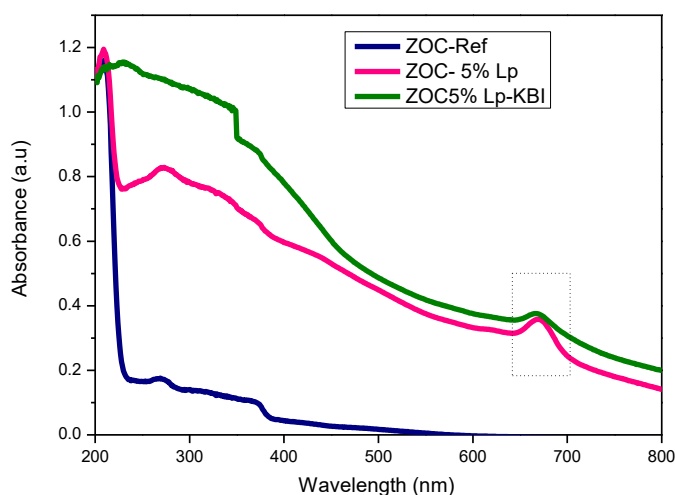


Figura A3. Espectros de absorción de UV-Visible del soporte ZOC, los biosoportes (Gp/Lp) y el sistema híbrido (biosoportes (Lp) /KBI).

A4 Evaluación de las propiedades mecánicas del soporte ZOC y biosoportes (ZOC-5% Lp)

Con base en las mediciones de nanoindentación realizadas sobre los materiales ZOC y ZOC-5% Lp, se observa un incremento en la dureza del material modificado con 5% de Lp,

reflejando una mayor área en comparación con el material de referencia, lo cual nos indica que el agregar el alga favorece la dureza del material. Los valores obtenidos fueron 41.6 para el biosoporte (ZOC-5%Lp) y 13.2 para el soporte ZOC-Ref. Lo anterior se expresa gráficamente en la **Figura A4**.

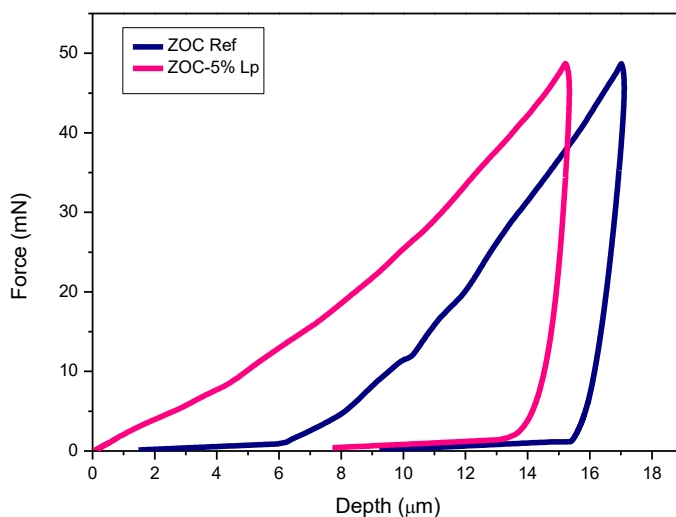


Figura A4. Comparación de las curvas típicas de carga-desplazamiento de ZOC Ref y ZOC-5% Lp.

A5. Propiedades texturales (BET)

Las isothermas de adsorción presentadas en la **Figura A5** nos muestran algunas diferencias entre los materiales evaluados. El ZOC-5 % Lp presenta un volumen adsorbido ligeramente mayor que el ZOC-Ref en todo el rango de presión relativa, sin embargo, en ambos casos los valores son bajos y no se observa evidencia de porosidad. Estos resultados indican que la modificación con algas no genera un efecto claro en la capacidad de adsorción del ZOC.

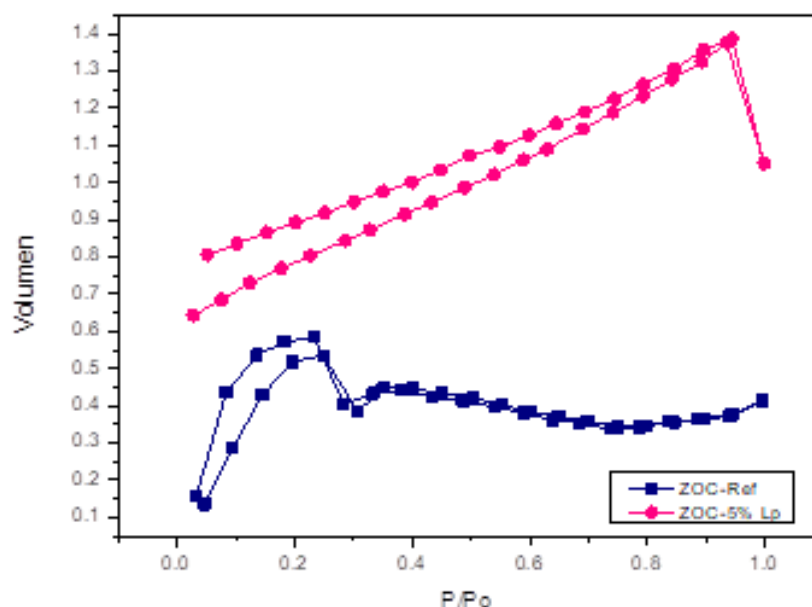


Figura A5. Isotermas de adsorción y desorción de los puntos graficados del área superficial de ZOC. (La gráfica presentada corresponde a resultados preliminares, actualmente en proceso de repetición experimental para su confirmación).

A6 Propiedades generales de los soportes ZOC

En la **Tabla A6** se presenta el resumen de las diversas propiedades del soporte de referencia y del biosoporte. Los parámetros evaluados son el área superficial específica (BET) refleja un aumento en el área superficial tras la incorporación del alga, lo cual indica mayor porosidad, el intervalo de energía prohibida (Band gap) también se favoreció al disminuir la brecha de conductividad, por otra parte la presencia del alga aumenta la dureza del soporte y la resistencia a la compresión. En general se observa que la adición de algas pardas (Lp) favorece las propiedades del soporte en todos los parámetros analizados.

Tabla A6. Resumen de las propiedades de los biosoportos ZOC.

Muestra	a_{BET} (m ² /g)	Band gap (eV)	Dureza (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)
ZOC	17	3.6	5	2
ZOC-5%Lp	24	2.2	29	7

A7. Adsorción de CO₂ mediante TGA

Además, se realizó un estudio preliminar de absorción de CO₂ mediante TGA, en el cual se sometieron las muestras a una atmosfera inicial de nitrógeno por 10 minutos y posteriormente a una atmosfera de CO₂. En general se puede afirmar que todas las muestras de este sistema son afines al CO₂ como se observa en la **Figura A7**.

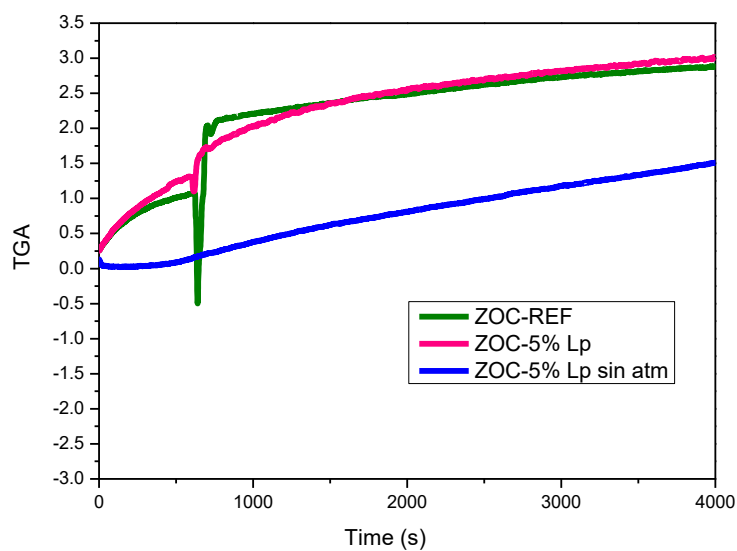


Figura A7. Adsorción de CO₂ mediante TGA de los biosoportos ZOC.

A8 Evaluación de la actividad fotocatalítica en la reducción de CO₂ del sistema híbrido

Finalmente se evaluó su actividad fotocatalítica para la reducción de CO₂ y se encontró que, el producto principal fue HCOOH. En la **Figura A7** se muestra la comparación de la producción de HCOOH de los soportes, los biosoportes y los biosoportes/fotocatalizador. Los materiales sin KBI (de referencia) mostraron baja actividad (<250 $\mu\text{mol h}^{-1}$) en comparación con el que contiene el fotocatalizador, el cual mostró altas eficiencias (>2000 $\mu\text{mol h}^{-1}$).

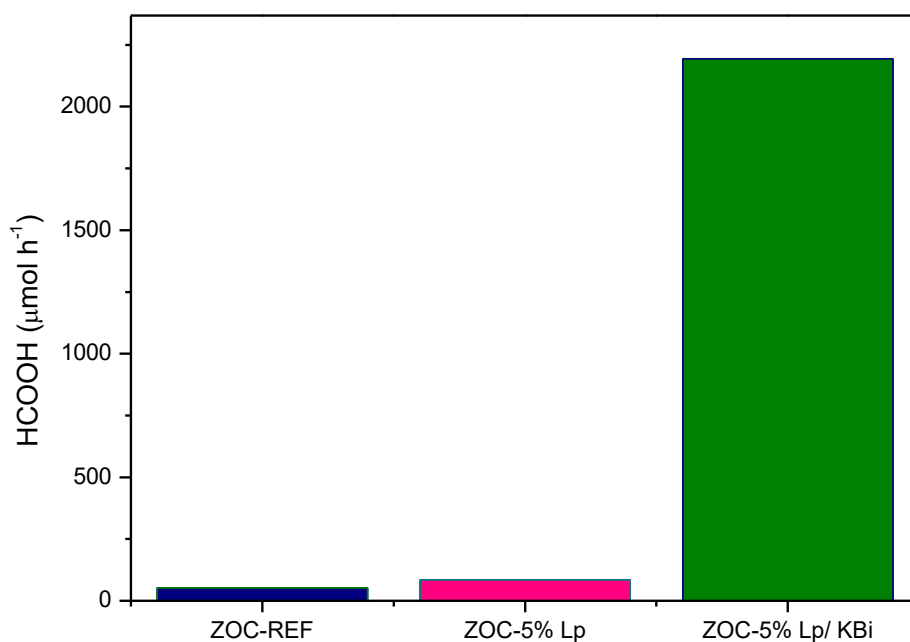


Figura A8. Comparación de la producción de HCOOH en la reducción de CO₂.

B. Evaluación exploratoria de soportes de Geopolímeros (GP)

B1. Caracterización morfológica del sistema híbrido

En la **Figura B1** se presentan las micrografías de los soportes de GP en las cuales de manera general se observa una superficie con partículas de morfología irregular y compacta.

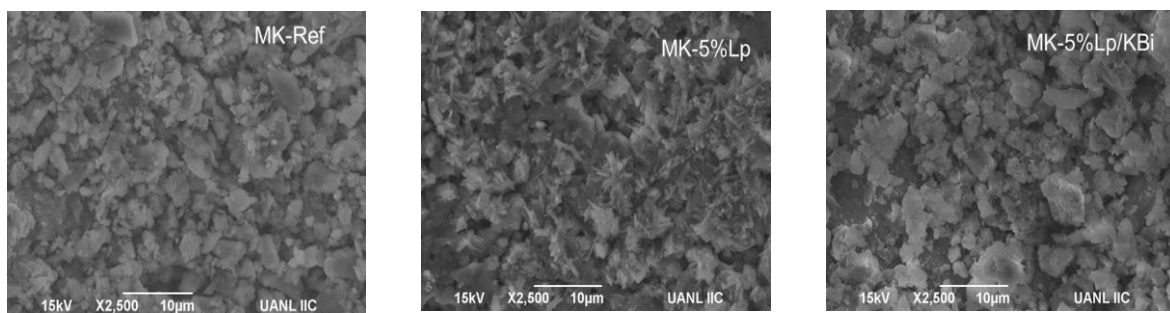


Figura B1 Micrografías de GP-Ref, GP-5%Lp y GP-5%Lp/KBI.

B2 Espectroscopía de Infrarrojo del sistema híbrido

Cómo podemos observar en la **Figura B2**, en ambas muestras se identifican bandas características asociadas a distintos grupos funcionales presentes en los sistemas híbridos. La banda en la región de $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ corresponde a los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$), comúnmente asociados con los alginatos y otros polisacáridos. Las bandas observadas entre ~ 1000 y 500 cm^{-1} se atribuyen a enlace $\text{Si}-\text{O}$ y $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$, características del soporte mineral [123,124] Por su parte, la adición del 5% de Lp genera una modificación en la intensidad de las bandas, lo que sugiere una interacción entre los componentes orgánicos del sargazo (como celulosa, quitosano, grupos carbonilo, amino y sulfato) y el soporte inorgánico, modificando sus propiedades químicas y estructurales.

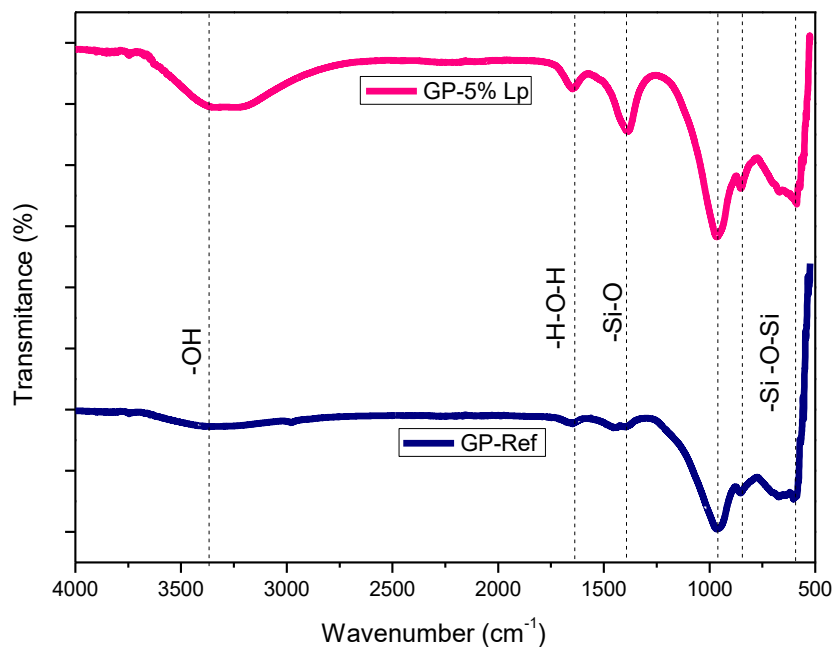


Figura B2. Espectros FTIR de GP y del biosoporte (GP- 5%Lp).

B3. Espectroscopia UV-Visible

Los espectros de absorbancia UV-Vis de las muestras GP-Ref, GP-5% Lp y GP-5% Lp-KBi presentados en la **Figura B3**, nos muestran un incremento en la absorbancia en la región visible del espectro, particularmente entre 650 y 700 nm en las muestras que contienen algas pardas, lo cual se atribuye a la presencia de clorofila *a* en los biosoportes. Este aumento en la absorción sugiere un potencial fotocatalítico mejorado. Además, la muestra GP-5% Lp-KBi muestra una absorbancia aún mayor, indicando que la incorporación de perovskitas KBI, favorece significativamente la captación de luz visible, reforzando su viabilidad para aplicaciones en procesos fotocatalíticos.

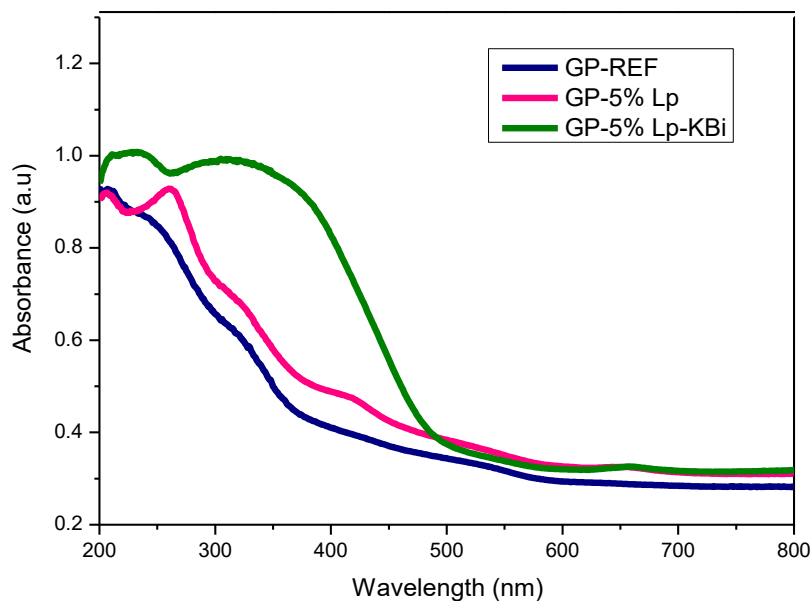


Figura B3. Espectros de absorción de UV-Visible del soporte GP, los bio soporte (Gp/Lp) y el sistema híbrido (bio soporte (Lp) /KBI).

B5 Propiedades texturales (BET)

Como parte del análisis de las propiedades texturales, se presentan las isotermas de adsorción de los puntos graficados del tamaño de poro del soporte GP de referencia (GP-Ref) y del bio soporte (GP-5% Lp). Con base en dicho análisis, se observa que el GP-Ref presenta baja capacidad de adsorción en comparación con el GP-5%Lp, no obstante, este último tampoco se considera un material poroso. Lo anterior se representa en la **Figura B5**, donde se aprecia claramente la diferencia en el perfil de adsorción entre ambos materiales.

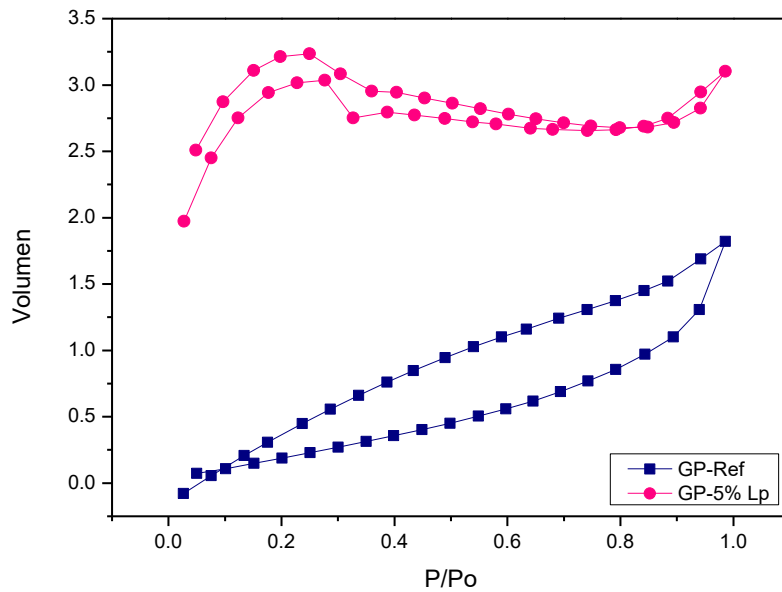


Figura B5. Isothermas de adsorción y desorción de los puntos graficados del área superficial de GP. (La gráfica presentada corresponde a resultados preliminares, actualmente en proceso de repetición experimental para su confirmación).

B6 Propiedades generales de los soportes GP

A continuación, en la **Tabla B6** se resumen las propiedades texturales, ópticas y mecánicas de los materiales GP y GP-5% Lp. Se observó un aumento en el área superficial de 12 a 21 m²/g tras la incorporación de algas pardas. Asimismo, se nota una disminución en el ancho de banda prohibida (*band gap*), lo que indica una mejora en la capacidad de absorción de luz visible. Sin embargo, en cuanto a las propiedades mecánicas, la dureza del material disminuye considerablemente con la adición del 5% de Lp. y, por último, la resistencia a la compresión se mantiene constante en ambas muestras, con un valor de 1 MPa.

Tabla B6. Resumen de las propiedades generales del soporte y biosoporte GP.

Muestra	a_{BET} (m^2/g)	Band gap (eV)	Dureza (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)
GP	12	3.3	31	1
GP- 5%Lp	21	2.7	< 1	1

B7 Adsorción de CO₂ mediante TGA

Los resultados del análisis termo-gravimétrico (TGA) al exponer las muestras GP a una atmósfera de CO₂ sugieren que no hay una diferencia significativa en la afinidad a este gas del GP de referencia y el biosoporte.

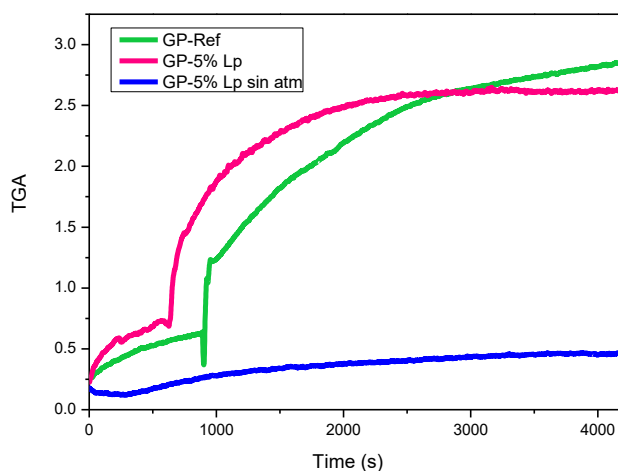


Figura B7. Adsorción de CO₂ mediante TGA de los biosoportes GP.

B8 Evaluación de la actividad fotocatalítica en la reducción de CO₂ del sistema híbrido

En la **Figura B8** se muestra la producción de ácido fórmico (HCOOH) durante la evaluación de la actividad fotocatalítica para la reducción de CO₂. Los resultados muestran que los materiales sin KBi presentaron una actividad significativamente menor ($<250 \mu\text{mol h}^{-1}$), por su parte el sistema GP-REF/KBi alcanzó una producción de aproximadamente $850 \mu\text{mol h}^{-1}$ y el sistema híbrido alcanzó una producción superior a $2000 \mu\text{mol h}^{-1}$. Esto confirma el papel clave del fotocatalizador en la mejora de la eficiencia del proceso de conversión de CO₂.

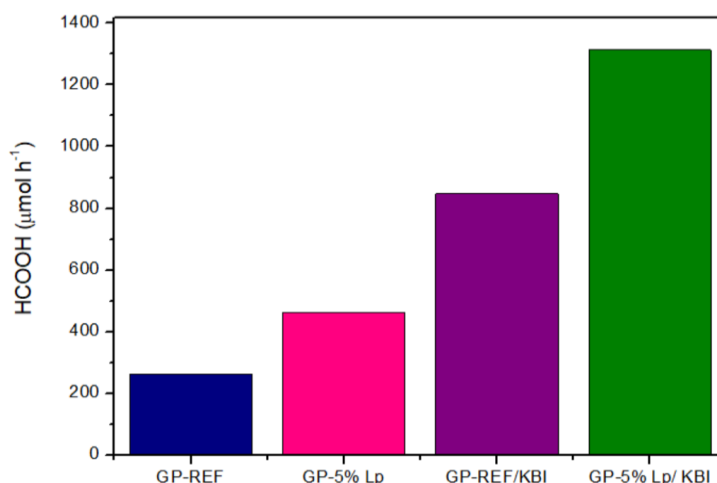


Figura B8. Comparación de la producción de HCOOH en la reducción de CO₂ de los soportes con GP

C. Comparativa de la producción de HCOOH de los cuatro soportes evaluados

En resumen, la **Figura C1** se muestran los resultados de la comparación de los cuatro tipos de soporte (MOC, GP, Clay y ZOC), bajo tres condiciones de evaluación: sin

modificación (REF), modificados con 5% de *Lobophora* sp. (Lp), y modificados con 5% de Lp e incorporando el fotocatalizador (perovskita $\text{K}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$) (KBI).

En todos los sistemas analizados, los materiales que incluyen la perovskita (barras verdes) mostraron una producción significativamente mayor de HCOOH, superando los $1000 \mu\text{mol h}^{-1}$ en los casos de MOC, Clay y ZOC. Particularmente, el sistema ZOC-5% Lp/KBI alcanzó el valor más alto de producción, superior a $2000 \mu\text{mol h}^{-1}$, indicando una alta eficiencia fotocatalítica. En contraste, los materiales sin fotocatalizador (REF y 5% Lp) mostraron una actividad significativamente menor, reflejando la importancia de la incorporación del KBI para un mejor desempeño del sistema híbrido en la producción de HCOOH.

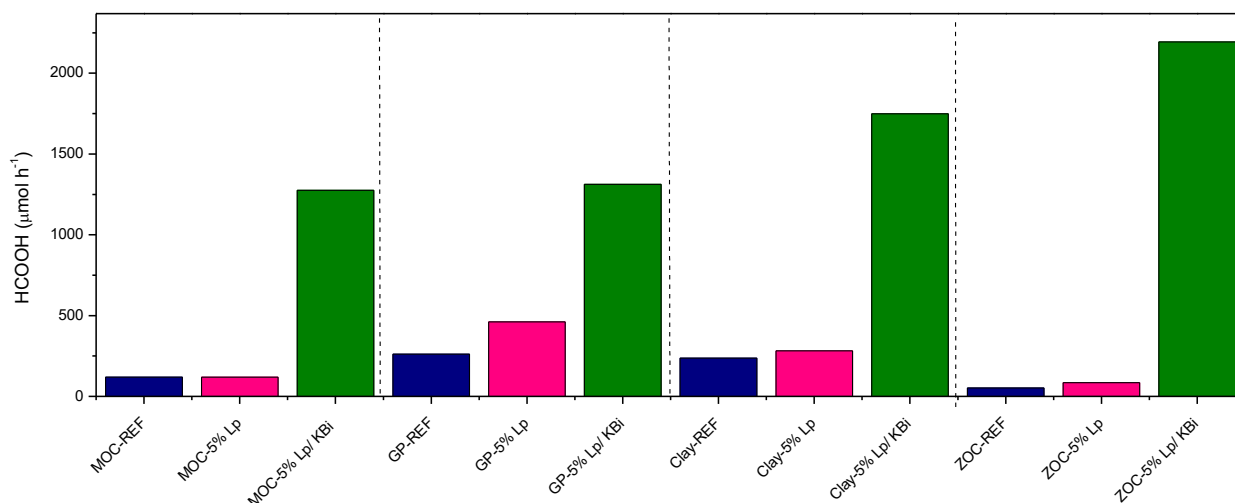


Figura C1. Comparación de la producción de HCOOH en la reducción de CO_2 de los cuatro soportes evaluados (MOC, GP, Clay y ZOC) bajo las 3 condiciones de evaluación.

CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas adicionales con soportes inorgánicos de ZOC y GP para explorar su capacidad de acoplamiento con algas pardas y su eficiencia en la fotoreducción de CO₂.

Las conclusiones generales de esta evaluación fueron:

Tanto los soportes ZOC como los GP, al ser combinados con algas pardas (*Lobophora sp.*), demostraron la capacidad de formar sistemas híbridos con propiedades modificadas.

En el caso de soportes ZOC, la incorporación del 5% de *Lobophora sp.* (Lp) favoreció positivamente la mayoría de las propiedades evaluadas. Se observó un aumento en el área superficial específica de 17 a 24 m²/g, una disminución en el *band gap* de 3.6 a 2.2 eV, esto debido a la presencia de clorofila a en las células de las algas y un incremento notable en la dureza de 5 a 29 MPa y la resistencia a la compresión de 2 a 7 MPa.

Morfológicamente, los biosoportes ZOC mostraron una estructura porosa, pero con una superficie más compacta que el ZOC de referencia. Sin embargo, al tacto los biosoportes eran más endebles y se desmoronaban con facilidad.

La adición de algas pardas en los GP también resultó en una mejora en la absorción de luz visible debido a una disminución del *band gap* de 3.3 a 2.7 eV. Sin embargo, la dureza del material disminuyó considerablemente con la adición del 5% de Lp de 31 a <1 MPa.

La incorporación del fotocatalizador de perovskita (K₃Bi₂I₉) fue fundamental para alcanzar altas eficiencias en la fotoreducción de CO₂ a ácido fórmico (HCOOH) en conjunto con las algas pardas en todos los tipos de soportes evaluados (MOC, GP, Arcilla y ZOC). Los sistemas híbridos que contenían el fotocatalizador en todos los casos superaron significativamente la actividad de los materiales de referencia y los biosoportes sin él.

Finalmente, los resultados anteriores refuerzan la hipótesis de que la combinación de algas pardas como aditivo y fotocatalizadores de perovskita (K₃Bi₂I₉) en soportes inorgánicos representa una estrategia prometedora y eficiente para la fotoreducción de CO₂, con el beneficio adicional de aprovechar un recurso abundante como el sargazo.