

Proyecto de Integración

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Biosorción de pentaclorofenol con *Sargassum sp.* en solución acuosa.

Proyecto de investigación

Trimestre 24-I

Presenta:

María del Mar Mondragón Aguilar

Matrícula 2123068997

Asesores:

Dr. Héctor Hugo León Santiesteban

Departamento de Energía, UAM Azcapotzalco

Dra. Araceli Tomasini Campocosio

Departamento de Bbiotecnología, UAM Iztapalapa

Julio, 2024

Declaratoria

Otorgamos nuestra autorización para la publicación del presente trabajo en caso de que el Comité de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental o la División de Ciencias Básicas e Ingeniería lo considere conveniente.

		
Alumna María del Mar Mondragón Aguilar	Asesor: Doctor Héctor Hugo León Santiesteban	Co Asesora: Doctora Araceli Tomasini Campocosio

Resumen

El pentaclorofenol es un plaguicida altamente tóxico para los seres vivos, considerado como posible carcinogénico por la EPA y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer. Sin embargo, esta sustancia es de libre uso en México, siendo incluso fabricada en nuestro país.

Es por esta razón que en el presente trabajo se utilizó un biosorbente a base de sargazo, para determinar la capacidad de adsorción de pentaclorofenol con este biosorbente.

El *Sargassum sp.*, o sargazo holopelágico, es una especie de alga marina que vive flotando en el Océano Atlántico, y que ha llamado la atención debido a su acumulación en las costas del Caribe y África.

Si bien el sargazo holopelágico juega un papel importante en la biodiversidad del Océano Atlántico, los arribazones de sargazo han ocasionado severos problemas ecológicos y económicos debido a su descomposición en las costas.

Agradecimientos

A mis padres Mariela y Jorge

Papá y mamá, no saben lo agradecida que estoy por ayudarme en todo lo que pudieron con mis estudios. Por las noches que se desvelaron cuando mi hermana y yo éramos pequeñas para entregar los trabajos escolares. Por motivarnos a no rendirnos. Y por haber sido nuestros *Reyes Magos*. Los amo.

A mi hermana

Quien es mi mejor amiga y ha sido un gran ejemplo para mí. Almita, muchas gracias por ser mi apoyo moral en mis estudios. Gracias por ser mi compañera de juegos. Te adoro y estoy muy orgullosa de ti.

A mi asesor, Dr. Héctor Hugo León Santiesteban

Profesor Hugo, muchas gracias por toda su paciencia y su guía en la realización de este proyecto, estoy muy contenta de haberlo realizado. Gracias además por todas sus clases, han sido verdaderamente mis favoritas de toda la carrera. He aprendido mucho de usted, es una persona que no solo admiro yo, sino muchos de mis compañeros. Siempre mi más profundo agradecimiento y respeto.

A mis profesores

Me gustaría mucho agradecer a mis profesores de cálculo Salvador Arellano Balderas y Jaime Grabinsky por sus asesorías llenas de retos.

A la Mtra. Claudia Medina Coyotzin

Maestra, muchas gracias por la ayuda brindada para la lectura de mis muestras en cromatografía, aprendí mucho en el proceso. Gracias también por todos sus consejos brindados, tanto para la vida profesional como personal.

A Guillermo

Gracias por estar conmigo en los momentos más complicados, por tu amor y apoyo, por animarme y por creer en mí. Quiero que sepas que yo también creo en ti. Gracias por compartir tu mundo conmigo.

A Angélica

Prima, gracias por llevarnos a mi hermana y a mí a conocer lugares bellísimos, otra cultura y otra forma de ver el mundo. Quiero decirte que ese viaje de niña me marcó para siempre. Te quiero mucho y te mando un abrazo enorme.

A mi tía Carolina

Tía, te recuerdo con mucho cariño. Sé que estarías muy contenta por nosotras. Gracias por tu apoyo y amor, gracias por haber sido tan risueña y hacernos reír siempre. Gracias por tus navidades, fueron las más bonitas, y gracias por tus pequeños regalos. Te recordamos y te llevamos en el corazón.

A mi conejita

Sé que ella no puede leer esto, pero gracias por acompañarme mientras escribía este proyecto, por desvelarte conmigo y animarme con tus interrupciones y travesuras. Gracias especiales a Pepito por todo el amor que nos dio, y a Kiwi, son unos angelitos más en el cielo.

A mis amigos

A Oscar, Karen, Arturo, Emmanuel y Lolita. Gracias, amigos, con ustedes aprendí que podemos elegir a nuestra familia. Los quiero mucho y atesoro todos los momentos que hemos pasado juntos. Gracias especiales a mi amigo Juan, por su apoyo durante esta última etapa en el laboratorio.

A mi universidad

Finalmente, quiero agradecer a mi casa de estudios, la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco y el personal académico, por brindar los espacios y el equipo, con los que fue posible que estudiara mi carrera en Ingeniería Ambiental. Gracias por el aprendizaje brindado en sus aulas. Estoy muy orgullosa de pertenecer a esta comunidad.

Índice

1 Introducción	13
1.1 Antecedentes	14
1.2 Justificación	14
2 Objetivos	16
2.1 General	16
2.2 Específicos	16
3 Marco teórico	17
3.1 Pentaclorofenol	17
3.1.1 Estructura química	17
3.1.2 Toxicología	19
3.2 Sargazo	20
3.3 Morfotipos	22
3.4 Composición química	23
3.5 Distribución geográfica	26
3.6 Impacto	28
3.6.1 Descomposición	28
3.6.2 Pastos marinos y arrecifes	29
3.6.3 Patógenos	30
3.6.4 Contaminantes	30
3.6.5 Arribazones	31
3.6.6 Salud humana	33
3.7 Aplicaciones potenciales	34
3.8 Mecanismos de sorción	37
3.9 Adsorción	38
3.9.1 Adsorbentes	39
3.10 Isotermas	40
3.10.1 Langmuir	40

3.10.2	Freundlich	41
3.11	Diseño experimental	43
3.11.1	Análisis de Varianza	43
3.11.2	Diseño factorial 2^k	44
3.11.3	Diseño de Compuesto Central (DCC)	45
3.11.4	Superficie de respuesta.....	47
4	Metodología.....	48
4.1	Recolección de la muestra	48
4.2	Preparación de la muestra.....	49
4.3	Caracterización del sargazo	50
4.3.1	Espectro FTIR.....	50
4.3.2	Extracción de lípidos	50
4.4	Solución madre de PCF	50
4.5	Diseño experimental.....	51
4.6	Diseño Central Compuesto 2^2 con puntos centrales.....	51
5	Métodos analíticos.....	52
5.1	Cuantificación de PCF por HPLC.....	52
6	Análisis de resultados.....	53
6.1	Caracterización del sargazo por FTIR	53
6.2	Extracción de lípidos	56
6.3	Diseño Central compuesto 2^2 con puntos centrales.....	58
7	Conclusiones.....	64
8	Referencias bibliográficas	65
9	Anexos.....	71
9.1	Reporte fotográfico	71
9.2	Lecturas con HPLC	78

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del pentaclorofenol	18
Tabla 2. Composición química de las algas marinas	25
Tabla 3. Desajuste de parámetros fisicoquímicos	28
Tabla 4. Notación de Yates para los niveles.....	44
Tabla 5. Notación para los niveles del DCC.....	46
Tabla 6. Tratamientos del diseño de compuesto central	52
Tabla 7. Enlaces y compuestos de los picos FTIR.....	54
Tabla 8. Resultados de extracción de lípidos.....	57
Tabla 9. Tratamientos y variable de respuesta del DCC	58
Tabla 10. Análisis de Varianza para q_e	59
Tabla 11. ANOVA para q_e excluyendo efectos.....	61
Tabla 12. Condiciones óptimas de pH y biomasa	63

Índice de figuras

Figura 1. Molécula de pentaclorofenol.....	17
Figura 2. Pentaclorofenato de sodio.....	18
Figura 3. Zona del Sargazo holopelágico.....	20
Figura 4. Mecanismos de sorción	37
Figura 5. Isoterma de Langmuir	40
Figura 6. Isotermas de Freundlich.....	42
Figura 7. Combinaciones de los niveles	44
Figura 8. Diseño de Compuesto Central	46
Figura 9. Superficie de respuesta de primer orden	47
Figura 10. Superficie de respuesta de segundo orden	47
Figura 11. Espectro IR de la muestra de sargazo	53
Figura 12. Macromoléculas observadas en el espectro FTIR.....	56
Figura 13. Espectro FTIR extracción de Lípidos.....	57
Figura 14. Efectos principales del modelo	60
Figura 15. Diagrama de Pareto	61
 Ilustración 1. Mapa de la distribución del sargazo holopelágico.....	 27
Ilustración 2. Mapa del sitio de muestreo	48
Ilustración 3. Muestra de Sargazo holopelágico.....	49

Abreviaturas y simbología

ANOVA	Analysis of variance
CAS	Identificador numérico de compuestos químicos de <i>Chemical Abstracts Service</i>
COPs	Compuestos orgánicos persistentes
DAD	Detector de arreglo de diodos
DCC	Diseño de compuesto central
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, por sus siglas en inglés
HPLC	Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia, por sus siglas en inglés
NERR	Región de Recirculación Ecuatorial del Norte
OD	Oxígeno disuelto
SCE	Suma de cuadrados entre las muestras
SCD	Suma de cuadrados dentro de las muestras
UV	Ultravioleta
pH	Potencial de hidrógeno
pKa	Constante de disociación
Log Kow	Coeficiente octanol-agua
S.	<i>Sargassum</i>
sp	Especie
spp	Especies
q_e	Capacidad de sorción o adsorción
q_m	Máxima capacidad de adsorción
C_e	Concentración de adsorbato en el equilibrio
C_o	Concentración inicial
K_L	Constante de sorción de Langmuir
K_F	Constante de sorción de Freundlich
M_L	Masa de matraz con los lípidos
M_o	Masa de matraz sin los lípidos
Al	Aluminio
As	Arsénico
Ba	Bario
B	Boro
C	Carbono
Cd	Cadmio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Hierro
Hg	Mercurio
K	Potasio

Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
N	Nitrógeno
Na	Sodio
Ni	Niquel
O	Oxígeno
P	Fósforo
Pb	Plomo
S	Azufre
Se	Selenio
Si	Silicio
V	Vanadio
Zn	Zinc
AsO_4^{3-}	ion arseniato
PO_4^{3-}	ion fosfato
Ca^{+2}	Catión de calcio
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
CO_3^{-2}	Carbonato anión
H^+	Protón H
HCO^{-3}	Bicarbonato
H_2CO_3	Ácido carbónico
OH^-	Ion hidroxilo
H_2O	Agua
C_6HCl_5O	Pentaclorofenol
C_6Cl_5ONa	Pentaclorofenato de sodio
CO_2	Dióxido de carbono
H_2S	Ácido sulfhídrico
HCl	Ácido clorhídrico
NaH_2PO_4	Fosfato de sodio
$Na_3C_6H_5O_7$	Citrato de sodio
NH_2	Grupo amino
NH_3^+	Amonio
$MeOH$	Metanol
$NaOH$	Hidróxido de sodio
PCF	Pentaclorofenol
M	Molar
kg	Kilogramo
g	Gramo
mg	Miligramo
μg	Microgramo
mol	Mol
L	Litro
ml	Mililitro
min	Minutos

μm	Micrómetro
bar	Unidad de presión
nm	Nanómetro
ppm	Partes por millón
rpm	Revoluciones por minuto
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
%	Porcentaje
$\pm$	Más menos
<	Menor que
>	Mayor que
$\ll$	Mucho menor
$\gg$	Mucho mayor
$\approx$	Casi igual que
=	Igual
=	Doble enlace
-	Enlace simple
F	Estadístico F
P	Valor P
(1), a, b, ab	Notación de Yates para los niveles de los factores

1 Introducción

Los compuestos orgánicos persistentes (COPs) son productos químicos de preocupación global debido a los daños a la salud humana, al medio ambiente y a la vida silvestre. Estas sustancias permanecen en el ambiente durante largos periodos, debido a su difícil degradación (World Health Organization, 2019) (Gobierno de México, 2020). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los COPs pueden incrementar el riesgo de cáncer, causar desórdenes reproductivos, deterioro neurológico, alteración del sistema inmune y defectos congénitos (World Health Organization, 2019). Estos contaminantes principalmente son plaguicidas, usados en diferentes sectores agropecuarios (Salvador & Salvador, 2009), y pueden llegar hasta los mantos acuíferos a través de las aguas residuales y por derrames accidentales.

El pentaclorofenol (PCF), es un compuesto orgánico aromático clorado, clasificado como un COP. En un principio, el PCF se utilizó como un conservador de la madera contra hongos e insectos; aunque también se ha aplicado como agente biocida de amplio espectro (US EPA, 2011)(*Toxic Substances Portal*, n.d.). Los usos más comunes del PCF son como herbicida, alguicida, fungicida, insecticida, defoliante y desinfectante (World Health Organization, 2010) (Environment Protection Agency, 2010).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica al PCF con un plaguicida altamente tóxico para mamíferos, plantas y muchos microorganismos (Visvanathan et al., 2005) (World Health Organization, 2010). La exposición prolongada al PCF puede causar al ser humano efectos nocivos en riñones, hígado, pulmones, sangre, sistema nervioso, inmunitario y tracto gastrointestinal (United Nations, 2020). Debido a los problemas contra la salud humana, la comunidad internacional ha optado por eliminar la producción y el uso del PCF. El Convenio de Estocolmo, celebrado en el año 2001, presenta una lista de químicos peligrosos, destinados a su prohibición o restricción, entre los que se encuentra el PCF, sus sales y esteres (World Health Organization, 2019).

El uso extendido del PCF ha provocado su liberación descontrolada en suelos y cuerpos de agua, siendo transportado por escorrentía superficial e infiltración (Visvanathan et al., 2005). Una alternativa para eliminar el PCF del medio ambiente es la biorremediación, la cual incluye a la biosorción y la degradación (León-Santiesteban et al., 2014). La biosorción es un proceso fisicoquímico, cuyos mecanismos pueden ser absorción, adsorción, intercambio iónico o precipitación (Fomina & Gadd, 2014). Los procesos de biosorción requieren material biológico, tales como: microorganismos y algas (vivos o muertos), materiales vegetales, desechos agrícolas y residuos naturales (Fomina & Gadd, 2014).

Un material biológico poco estudiado desde el punto de vista de biosorción son las macroalgas. Las macroalgas presentan cierta capacidad para biosorber contaminantes (Milledge et al., 2019). Incluso, la biomasa de las algas del género *Sargassum* es un excelente material biosorbente de metales pesados (Volesky et al., 2000). Dentro de este género, se pueden encontrar a las algas *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*, conocidas coloquialmente como Sargazo, y que se han acumulado en las playas del mar Caribe en grandes cantidades (Pérez, 2019).

Sargassum es un género de algas pardas perteneciente al orden Fucales, las cuales crecen en ambientes marinos tropicales y subtropicales (Dreckmann, 2013) (Baweja et al., 2016). Éstas presentan vesículas hinchadas en forma de bayas que les permiten flotar (Baweja et al., 2016). Las especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* son macroalgas marrones pelágicas, que se encuentran exclusivamente en el Océano Atlántico (Stout et al., 2018). Dichas especies ya eran famosas, pues integran el famoso Mar de los Sargazos.

1.1 Antecedentes

La biomasa de sargazo ha sido un biomaterial poco estudiado desde el punto de vista de biosorción. Los pocos trabajos reportados se han centrado en la remoción de metales pesados. Volensky et al., 2000 utilizaron biomasa no viable de varias especies de sargazo, entre ellas *S. fluitans*, para biosorber cadmio y cobre. En dicha investigación, se encontró que la capacidad máxima de biosorción con *S. fluitans* fue de 79.41 mg/g y 51.09 mg/g, para cadmio y cobre respectivamente, a un pH de 4.5 y con una concentración de biosorbente de 2 g/L (Volesky et al., 2000). Tabaraki et al., 2014, estudiaron la biosorción de plomo II con *Sargassum ilicifolium* no viable en medio acuoso, consiguiendo una capacidad de biosorción máxima de 195 mg/g, a un pH óptimo de 3.7 y con una dosis de biosorbente de 0.2 g/L. En dicho trabajo se aplicó una metodología de superficie de respuesta, obteniendo un modelo polinomial de segundo orden (Tabaraki et al., 2014). En 2014, Hardouin et al., 2014, caracterizaron químicamente la biomasa de *Sargassum spp.* y encontraron 10.2% de proteína, 9.8% de fibra cruda, 26.2% de cenizas y 41.8% de carbohidratos totales y 47.06% de carbohidratos después de hidrólisis.

Actualmente, no existen trabajos relacionados con la biosorción de plaguicidas, como el PCF, con biomasa de las especies *Sargassum fluitans* o *Sargassum natans*.

1.2 Justificación

México es consciente de los daños que provoca la exposición del pentaclorofenol a las personas y al medio ambiente. En 1998 el Senado de la República ya había aprobado el convenio de Rotterdam, donde se incluye al PCF como un plaguicida perjudicial (United Nations, 2020), y en 2001 México firmó el convenio de Estocolmo, en el cual se acepta su prohibición (Vinet & Zhedanov, 2010).

Sin embargo, a pesar de las alertas internacionales sobre el uso de PCF, éste es un biocida que aún cuenta con registro comercial para su uso en nuestro país (Enciso, 2017). El PCF es utilizado como conservador de madera por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para tratar postes y crucetas (Enciso, 2017). Incluso, puede ser adquirido con facilidad en tiendas físicas y en línea.

Además, México es productor de PCF, siendo fabricadas entre 6 mil y 7 mil toneladas al año, de las cuales exporta el 99.98% a Estados Unidos. De acuerdo datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (Enciso, 2017). En México no existe fecha para dejar de usar y producir PCF, y su limitación es muy escasa (Enciso, 2017). Es importante recordar que

hace casi 30 años, la formuladora de plaguicidas Agricultura Nacional de Veracruz S. A. (Anaversa) en Córdoba, Veracruz, explotó. Derramando 38 mil litros de sustancias altamente tóxicas entre las que se encontraba PCF (Cancino, 2018). Hasta la fecha, los daños a la salud de los habitantes de este municipio son irreversibles, pues se han registrado al menos mil 500 casos de cáncer (Cancino, 2018).

Por otro lado, las especies de sargazo *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* representan un problema ambiental y económico grave en México. A partir del año 2011 se empezaron a detectar acumulaciones atípicas en el mar Caribe y en las costas de África (Muñoz, 2019) (Louime et al., 2017). Para el año 2015 comenzaron los arribazones considerables de sargazo en las playas mexicanas, y en los años 2018 y 2019 las cantidades se volvieron alarmantes (Muñoz, 2019).

Estas acumulaciones de sargazo han representado un grave problema por los impactos negativos al turismo y a los ecosistemas costeros. Una forma de dimensionar las cantidades de sargazo es comparándolas con la pesca nacional: el sargazo llegó a 20 millones de toneladas en 2018, mientras que la pesca fue de 2.16 millones de toneladas en 2017 (Gobierno de México, 2019) (Muñoz, 2019). Estas cifras son insólitas y se espera que sea un problema permanente (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 2020).

De acuerdo con la Dra. Brigitta I. Van Tussenbroekel, del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, el sargazo en estas cantidades genera mareas marrones, provocadas por los lixiviados de estas macroalgas en descomposición. Dichas mareas, obstruyen la luz, ocasionando que las plantas en el fondo dejen de fotosintetizar y por consecuencia dejen de producir oxígeno. A su vez, esta falta de oxígeno también es provocada por la gran actividad bacteriana de la descomposición. Una consecuencia de esto, ha sido la disminución de los pastos marinos y del coral vivo (van Tussenbroek et al., 2017).

Se sabe que el sargazo en pequeñas cantidades es benéfico ya que aporta nutrientes, sin embargo, los arribos masivos lo vuelven un residuo que se descompone y erosiona las costas (UNAM, 2019). Además, el arsénico y los metales pesados que acumulan estas macroalgas pueden filtrarse a través del suelo poroso y llegar a mantos freáticos (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 2020) (Pérez, 2019).

El conocimiento científico sobre las aplicaciones que pueden tener estas especies de sargazo (*Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*) aún es muy limitado. México tiene la oportunidad de ver el sargazo como un recurso para el desarrollo de productos que incluyan aplicaciones ambientales. Es por todo lo anterior expuesto que, se propone aprovechar la abundancia de dichas especies para biosorber un plaguicida dañino como lo es el pentaclorofenol, abordando así dos problemas presentes en nuestro país.

2 Objetivos

2.1 General

Encontrar las condiciones óptimas de biosorción de PCF con *Sargassum sp.* en solución acuosa por medio de un diseño experimental de superficie de respuesta.

2.2 Específicos

1. Producir un biosorbente a base de *Sargassum sp.*
2. Caracterizar el biosorbente de *Sargassum sp.* mediante Espectrometría de Infrarrojo con Transformada de Fourier.
3. Utilizar un Diseño Central Compuesto 2^2 para encontrar las condiciones óptimas de pH y dosis de sargazo para maximizar la biosorción de PCF.

3 Marco teórico

3.1 Pentaclorofenol

El pentaclorofenol (PCF) es un plaguicida debido a sus efectos como herbicida, alguicida, fungicida y molusquicida (Bustos, 2012). Esta sustancia se popularizó por su uso para la conservación de la madera, y había sido producido en Estados Unidos a través de la cloración de fenol, o bien, la hidrólisis alcalina de hexaclorobenceno (National Toxicology Programs, 2016).

El PCF está considerado como un plaguicida peligroso dentro del convenio de Rotterdam, cuyo uso está restringido con el procedimiento *Consentimiento Fundamentado Previo* (FAO & PNUMA, 2013). Siendo peligroso para la vida acuática y el medio ambiente, cuyos efectos son de larga duración (Pohanish, 2017).

3.1.1 Estructura química

El PCF es un compuesto aromático clorado, como se muestra en la Figura 1. El PCF es una sustancia incolora a blanca y un sólido cristalino (Pohanish, 2017). En forma pura es relativamente volátil y prácticamente insoluble en agua, pero soluble en la mayoría de los solventes orgánicos (National Toxicology Programs, 2016).

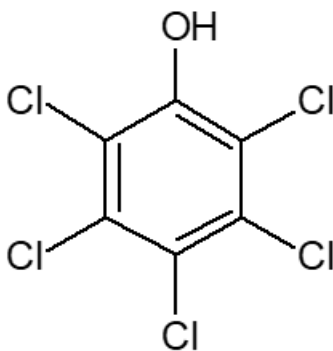


Figura 1. Molécula de pentaclorofenol

El número de CAS para esta sustancia es 87-86-5.

Las propiedades fisicoquímicas del PCF se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Propiedades del pentaclorofenol

Propiedad	
Formula química	C_6HCl_5O
Peso molecular	266.3
Densidad	1.978 g/cm ³ , a 22°C
Punto de fusión	188°C
Punto de ebullición	310°C
pKa	4.7
Solubilidad en agua	14 mg/L a 25°C
Log Kow	5.0
<i>Fuente: (National Toxicology Programs, 2016) (Pohanish, 2017)</i>	

El PCF se puede encontrar en forma de sales, las cuales son fácilmente solubles en agua, como el PCF de sodio (C_6Cl_5ONa) cuyo número de CAS es 131-52-2, (National Toxicology Programs, 2016).

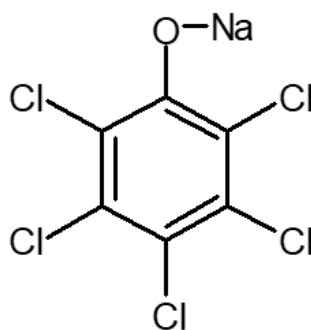


Figura 2. Pentaclorofenato de sodio

Es importante destacar que, durante la producción de PCF, las elevadas temperaturas y presiones resultan en la formación de otras moléculas cloradas (National Toxicology Programs, 2016). Además, las formas comerciales de PCF contienen subproductos derivados de su síntesis, en cantidades que son detectables de acuerdo con el *National Toxicology Programs*, del Departamento de Salud y Servicios Humanos de Estados Unidos.

Los subproductos más comunes encontrados son:

- Fenoles policlorados
- Hexaclorobenceno
- Hexa-, hepta-, y octaclorodibenceno-*p*-dioxina
- Hexa-, hepta- y octaclorodibenzofuranos (National Toxicology Programs, 2016)

3.1.2 Toxicología

Estudios han mostrado que el PCF se absorbe a través de la piel, vías respiratorias y tracto gastrointestinal de acuerdo con (Bustos, 2012). Una vez absorbido, el PCF se fija en proteínas de la sangre, donde se distribuye a otros tejidos del cuerpo, incluyendo riñones y corazón (Bustos, 2012), incrementando el riesgo de cáncer (Pohanish, 2017).

Como el PCF de uso comercial es una mezcla de PCF y otros subproductos formados durante su obtención, los estudios de toxicología hacen referencia al conjunto de estas sustancias (National Toxicology Programs, 2016).

El PCF es una sustancia que puede ocasionar envenenamiento severo o muerte. Entre los efectos de una exposición aguda, se pueden encontrar irritación de nariz, garganta, ojos y piel (Bustos, 2012). Sin embargo, los síntomas por envenenamiento son hipertermia, espasmos musculares, temblores, respiración difícil, dolor abdominal, mareo, vómito, confusión mental, transpiración, debilidad y sed, de acuerdo con (Bustos, 2012).

No obstante, ante el envenenamiento por PCF no existe un antídoto específico, siendo el único tratamiento el control de la fiebre, remplazo de fluidos y oxígeno (Bustos, 2012).

Por otra parte, el PCF origina metabolitos mutagénicos, causando daño en el ADN y rotura de cromosomas (National Toxicology Programs, 2016), lo que incrementa el riesgo de cáncer. De acuerdo con Biscaldi et al., 1986, su mecanismo de acción es interferir con la producción de ATP por la mitocondria, desacoplando la fosforilación de ADP.

Asimismo, el PCF debilita el sistema inmunitario, e inhibe la apoptosis de las células (National Toxicology Programs, 2016).

El límite máximo permitido en Estados Unidos (MCL) para agua potable, es de 0.001 mg/L (Pohanish, 2017).

3.2 Sargazo

Las algas marinas o macroalgas son organismos marinos fotoautótrofos que pueden ser desde unicelulares hasta multicelulares (Anand et al., 2023), y se clasifican en tres grandes grupos: algas verdes, algas rojas y algas marrones (pardas) (Farghali et al., 2023). Las algas verdes constituyentes del filo *Chlorophyta*, tienen alrededor de 1800 especies, las algas rojas que constituyen al filo *Rhodophyta* tienen alrededor de 7200 especies, y las algas marrones que conforman a la clase *Phaeophyceae* cuentan con alrededor de 2000 especies (Farghali et al., 2023). Dentro del grupo de las algas marrones se encuentra el género *Sargassum*, comúnmente conocido como “sargazo”.

Las especies del género *Sargassum* están distribuidas en aguas sublitorales y usualmente forman pastizales o bosques submarinos a lo largo de las costas (Stiger-Pouvreau et al., 2023). De este modo, la densa vegetación formada por las especies de este género, proporciona hábitats para peces, mariscos, copépodos, crustáceos y también otras algas como las epífitas (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

El género *Sargassum* pertenece a la familia *Sargassaceae*, orden *Fucales*, clase *Phaeophyceae* y filo *Ochrophyta* (Stiger-Pouvreau et al., 2023), siendo un diverso grupo dentro de las algas pardas, conformado por 362 especies taxonómicas (Dassié et al., 2022).

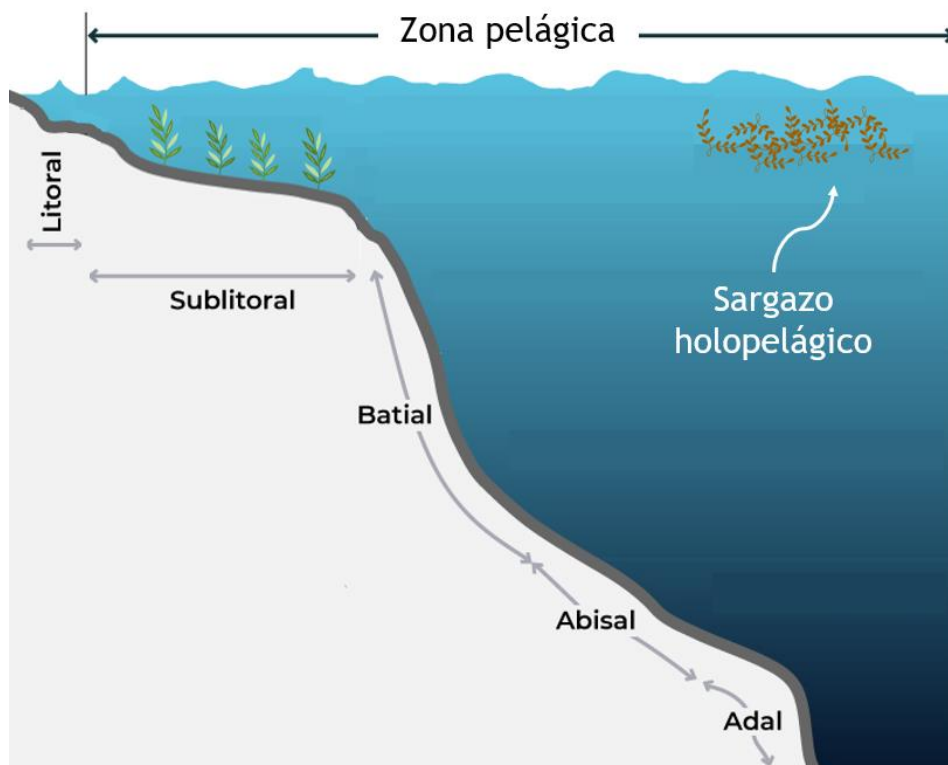


Figura 3. Zona del Sargazo holopelágico

La mayoría de las especies de *Sargassum* son bentónicas, es decir, viven en el suelo marino sujetas del sustrato (Theirllynck et al., 2023) (Stiger-Pouvreau et al., 2023). Sin embargo, existen sólo dos especies de sargazo que son holopelágicas, lo que significa que pasan su ciclo de vida flotando en el Océano Atlántico: *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* (Stiger-Pouvreau et al., 2023) (Dassié et al., 2022), como se puede observar en la Figura 3. El término holopelágico proviene del griego ὅλο que significa “todo”, y del latín pelagĭcus, que hace referencia a organismos que viven en zonas alejadas de la costa, de acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española.

En 2013, Smetacek & Zingone usaron el término “mareas doradas” para referirse a las masas flotantes de sargazo, debido al color marrón amarillo que recuerda al oro. Muchas especies de *Sargassum* tienen la capacidad de flotar en la superficie del océano gracias a sus vesículas de aire, pero a diferencia de las únicas dos especies holopelágicas, las demás solo flotan durante una parte de su ciclo de vida (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

El sargazo holopelágico juega un papel vital en la biodiversidad del Océano Atlántico, ya que conforma el hábitat de diversas especies (muchas de ellas endémicas), como peces, invertebrados, tortugas marinas y aves, además de servir como sitios de desove y viveros (Dassié et al., 2022). Es importante decir que, estas algas son la única forma de sustrato en aguas abiertas (Theirllynck et al., 2023).

Además, la comunidad microbiana del sargazo holopelágico está compuesta principalmente por fotoheterótrofos degradadores de materia orgánica y también por bacterias potencialmente patógenas pertenecientes a las familias *Pseudomonadaceae*, *Rhodobacteraceae* y *Vibrionaceae* (Theirllynck et al., 2023).

Al igual que el resto de las algas marinas, el sargazo holopelágico (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*) proporciona distintos beneficios ambientales, como captura de carbono, mitigación de la eutroficación, regulación de la acidificación del océano y protección de las costas (Farghali et al., 2023). La llegada de pequeñas cantidades de sargazo son beneficiosas para la fertilización de dunas, ya que ayudan a reducir la erosión costera causada de forma natural por las tormentas o el incremento del nivel del mar (Rodríguez-Martínez et al., 2023) (Williams & Feagin, 2010).

Debido a esto, la proliferación del sargazo holopelágico puede contribuir con la reducción del calentamiento global, ya que el sargazo holopelágico remueve grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera, transformándolo en carbonato de calcio, como calcita, y produciendo sedimentos al terminar su ciclo de vida (Paraguay-Delgado et al., 2020). Es importante destacar que, la absorción de CO₂ por las algas a través de la fotosíntesis es mayor que la de las plantas terrestres (Chávez-Guerrero et al., 2021).

El metabolismo de las especies de *Sargassum* y su respuesta a los cambios en el entorno, dependen de la variedad de ambientes en los cuales viven, que pueden ser: pelágico o béntico, y templado o tropical (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Varias especies de *Sargassum* presentan reproducción sexual y/o asexual (Stiger-Pouvreau et al., 2023). En el caso de las especies holopelágicas *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*, la reproducción asexual es el principal modo de reproducción, debido a que no se han observado receptáculos en estas dos especies, siendo la fragmentación vegetal su único modo reproductivo conocido (Stiger-Pouvreau et al., 2023). Bajo condiciones favorables el sargazo logra altas velocidades de reproducción y gran dispersión en poco tiempo, modificando los ecosistemas circundantes (Paraguay-Delgado et al., 2020).

En general, las algas pueden usar energía solar para asimilar nutrientes inorgánicos en sustancias orgánicas y producir así biomasa (Anand et al., 2023).

3.3 Morfotipos

Como se describió anteriormente, *Sargassum* es un género de macroalgas pardas en el que se encuentran las especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*, que son las únicas holopelágicas.

La clasificación del género *Sargassum* se basa principalmente en características morfológicas incluyen la forma de sus rizoides, hojas, vesículas y receptáculos (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

De acuerdo con Theirlynck et al., 2023, y Changeux et al., 2023; de las especies de sargazo holopelágico se destacan tres morfotipos:

- *Sargassum natans* VIII
- *S. natans* I
- *S. fluitans* III

Distinguiéndose por el número y tamaño de las hojas, flotadores por tallo, y presencia de espinas (Changeux et al., 2023). Además, la superficie del tallo puede ser suave, arrugada, o con espinas dorsales parecidas a hojas (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

De acuerdo con Theirlynck et al., 2023, *S. natans* VIII se caracteriza por ausencia de espinas, *S. natans* I se distingue por hojas estrechas y *Sargassum fluitans* III se distingue por la presencia de espinas a lo largo del tallo.

Es importante decir que, desde los comienzos de afloramientos masivos de sargazo en el año 2011, se han observado variaciones en la abundancia de sus morfotipos (Changeux et al., 2023). Existe una dominancia de *S. fluitans* III en las recientes observaciones en la región del Caribe y la ruta al cinturón del Sargazo (Changeux et al., 2023). En una investigación reciente, se observó que el morfotipo *S. fluitans* III crece más rápido que los morfotipos *S. natans* VIII, *S. natans* I, posiblemente por la diferencia en la composición de su tejido (Changeux et al., 2023).

Las diferencias fisiológicas entre cada morfotipo de sargazo holopelágico, puede impactar en la composición su tallo, incluyendo las relaciones C:N, N:P, C:P, y los isótopos de C-13 y N-15 (Changeux et al., 2023).

3.4 Composición química

Las algas marinas en general, contienen de 70 a 90% de agua en peso húmedo, y están compuestas principalmente por:

- 25 a 77% carbohidratos
- 5 a 43% proteínas
- 9 a 50% cenizas
- 1 a 5% lípidos

En peso seco, las algas de mar generalmente tienen alto contenido de ceniza, aproximadamente 20%, posiblemente por la absorción de compuestos inorgánicos (Thadhani et al., 2019). La mayoría de los carbohidratos presentes en las algas marinas son celulosa, sacarosa, almidón, carragenina, ulvan, laminarina, manitol, agar, fucoidan y alginato (Farghali et al., 2023). Además, presentan bajo contenido de lignina, tan bajo como 0.03 g/kg en peso seco (Farghali et al., 2023). El alginato es el principal polisacárido de algunas especies de *Sargassum* (Thadhani et al., 2019).

Es importante decir que, las algas marrones son de color olivo verdoso a marrón oscuro, debido a la presencia de pigmentos de fucoxantina que enmascaran el color original de la clorofila (Farghali et al., 2023).

De acuerdo con Changeux et al., 2023, la composición elemental del tejido del sargazo holopelágico, es significativa para el nitrógeno y la relación C:N, para otros elementos los valores son: 23.52 % de carbono, 0.07 % de fósforo, N:P = 30.33 y C:P = 827.43.

En un estudio publicado por Carrillo-Domínguez et al., 2023, la concentración de elementos orgánicos en el sargazo holopelágico fue de 27 a 33% de carbono, 3 a 5% de hidrógeno, 21 a 32% de oxígeno, 0.05 a 1.7% de nitrógeno, y 0 a 1.4% de azufre de acuerdo con. Y de acuerdo con Olguín-Maciel et al., 2022, obtuvieron 34.5% de carbono, 3.23% de hidrógeno, 1.41% de nitrógeno y 1.70% de azufre.

Por otro lado, la biomasa de sargazo holopelágico contiene 16.1 ± 0.6 p/p % de sólidos totales, de los cuales $69.6 \pm 3.4\%$ son volátiles (Castro et al., 2022). Así como 6.9 ± 0.9 g de grasas, 10.5 ± 0.6 g de fibras, y 11.6 ± 0.6 g de proteína en 100 g de peso seco (Castro et al., 2022). En otro estudio se obtuvo de proteína un intervalo de 2.2 a 15.4% base seca, fibra 7.2 a 17% base seca, extracto etéreo 0.01 a 4.6% base seca, y compuestos fenólicos totales 80 mg/100g base seca (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

Las algas marrones contienen menores niveles de proteína que las algas verdes y rojas, su intervalo es de 6 a 20% (Stiger-Pouvreau et al., 2023). En el caso de los lípidos, éstos son componentes menores en macroalgas marrones con valores tan bajos como 1%, con un máximo de 4 a 6%, lo que puede deberse a los altos requerimientos de luz para la fotosíntesis (Stiger-Pouvreau et al., 2023). Además, las especies de *Sargassum* pueden contener mayores niveles de ácidos grasos poliinsaturados que las plantas terrestres, de acuerdo con Stiger-Pouvreau et al., 2023.

La cantidad de humedad de sargazo holopelágico es de 86.5%, el contenido de cenizas de 22.63%, lignina 31.96% (Olguin-Maciel et al., 2022). Cuando el alga es secada la humedad se reduce a un rango de 5 a 17% (Carrillo-Domínguez et al., 2023). De acuerdo con Carrillo-Domínguez et al., 2023, el contenido de ceniza de sargazo holopelágico es de 8.7 a 55.7% base seca. En una investigación de Paraguay-Delgado et al. en 2020, el *sargazo holopelágico* presenta contenido de cenizas por arriba del 36%, con el calcio siendo el principal elemento, sugiriendo así la presencia de carbonato de calcio.

El alto contenido de ceniza en esta macroalga se debe a la presencia de sales y minerales en el ambiente y la habilidad del sargazo holopelágico para acumular metales y metaloides (Olguin-Maciel et al., 2022). La capacidad de las algas para absorber minerales de su entorno depende de factores externos como la ubicación geográfica, estación, temperatura y pH del agua de mar, exposición a las olas, y el tiempo de residencia oceánica (Thadhani et al., 2019).

Como otras algas marrones, el sargazo holopelágico puede absorber macro y microelementos del agua (Carrillo-Domínguez et al., 2023). Las principales trazas de elementos encontradas en estas algas marrones son hierro, manganeso, cobre, zinc, cobalto, molibdeno, selenio y yodo (Stiger-Pouvreau et al., 2023). La concentración de elementos en muestras de sargazo holopelágico se pueden ordenar como sigue $As > Fe > Mn > Al > Zn > V > Ni > Cu > Cr > Cd > Hg$ (Dassié et al., 2022).

En un estudio de Castro et al. en 2022 realizado en la biomasa de algunas especies de *Sargassum*, se encontraron las siguientes concentraciones de elementos: 4.8 ± 1.9 g/kg de nitrógeno, 0.56 ± 0.16 g/kg de fósforo, y 39.5 ± 3.4 g/kg de potasio, 120 ± 18.4 mg/kg de sodio, y la salinidad de 13.8 ± 4.4 g/kg. Otros minerales presentes en la biomasa son: 339.5 ± 147.8 mg/kg Fe, 241.0 ± 8.5 mg/kg Mn, 24.1 ± 0.8 mg/kg Zn, 18.1 ± 2.3 mg/kg Ni, 0.2 ± 0 mg/kg Pb, 96.4 ± 13.6 mg/kg Co, 58.9 ± 0.4 mg/kg S, y 7.6 ± 1.1 g/kg B. Sin embargo, minerales debajo del límite de detección fueron Cr (< 23.5), Cu (< 23.5), As, (< 1.2), Ba (< 46.9), Cd (< 11.7), Mo (< 20.0), and Se (< 20.0) in mg/kg (Castro et al., 2022).

Especies de *Sargassum* contienen metabolitos (como los taninos, flavonoides y florotaninos), que como las demás algas marinas, producen para protegerse de condiciones externas, estrés, y de especies herbívoras (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

En general, las algas marinas contienen metabolitos secundarios, compuestos fenólicos, y terpenoides (Stiger-Pouvreau et al., 2023). La producción de compuestos fenólicos en las

macroalgas marrones es una defensa química contra colonización de bacterias y herbívoros (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Las características fisicoquímicas de las algas marinas y pardas hasta el género *Sargassum* se resumen en la Tabla 2:

Tabla 2. Composición química de las algas marinas

	Algas marinas	Algas pardas	Género <i>Sargassum</i>	Sargazo holopelágico	Identificación bibliográfica
Carbohidratos	25 a 77% (1)				1
Celulosa					
Almidón					
Lignina	0.03 g/kg (1)			≈30% (6)	1, 6
Proteínas	5 a 43% (1)	6 a 20% (5)		≈11% (3), 2.2 a 15.4% (4)	1, 3, 4, 5
Lípidos	1 a 5% (1)	1%, con un máximo de 4 a 6% (5)		≈7% (3)	1, 3, 5
Fibras				10.5% (3), 7.2 a 17% (4)	3, 4
Cenizas	9-50% (1)			8.7 a 55.7% (4)	1, 4
Sólidos Suspendidos Totales				≈16%	3
Sólidos Suspendidos Volátiles				≈70%	3
Sólidos Suspendidos Fijos					
Elementos orgánicos					
Carbono				23 a 33%	2, 7
Hidrógeno				3 a 5%	2
Nitrógeno			≈ 4.8 g/kg (3)	0.05 a 1.7% (2)	2, 3
Azufre			58.9 g/kg (3)	0 a 1.4% (2)	2, 3
Fósforo			0.56 g/kg (3)	0.07 % (7)	3,7
Potasio			39.5 g/kg		3
Oxígeno				21 a 32%	2
Fuentes:			4. Carrillo-Domínguez et al., 2023		
1. Farghali et al., 2023			5. Stiger-Pouvreau et al., 2023		
2. Carrillo-Domínguez et al., 2023			6. Olguin-Maciel et al., 2022		
3. Castro et al., 2022			7. Changeux et al., 2023		

Como se vio anteriormente, las dos especies holopelágicas de sargazo presentan morfotipos, y por lo tanto el contenido de ceniza, lípidos, proteínas, carbohidratos, fibra y alginato, varía de acuerdo con la especie y el fenotipo (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Se ha observado que, cuando se exponen a agua de mar enriquecida con nutrientes, las especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* incrementan su crecimiento y fotosíntesis con la adición de fósforo, pero no con nitrógeno (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Es importante mencionar que el sargazo holopelágico puede acumular arsénico debido a su semejanza con el fosfato, permitiendo al arseniato entrar a las células del alga a través del mecanismo de transporte de fosfato (Carrillo-Domínguez et al., 2023). El arsénico puede presentarse tanto en formas orgánicas como inorgánicas, siendo la última la más tóxica (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

La composición química de las especies de *Sargassum* puede ser influenciada por factores abióticos, como la localización geográfica, estación, temperatura del agua y salinidad, pero también está relacionado a la madurez de su talo, y al método de extracción (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Por último, para poder transportar y almacenar la biomasa de las algas, éstas deben pasar por un proceso de secado, que pueda reducir su peso y mejorar su manipulación.

El proceso de secado reduce el volumen y el riesgo por contaminación por hongos y bacterias, y permite el almacenamiento por varios años (Carrillo-Domínguez et al., 2023). De acuerdo con Carrillo-Domínguez et al., en 2023, el método de secado no afecta el contenido de lípidos y proteínas. Sin embargo, esto podría modificar el contenido de algunos minerales, ácido ascórbico, ácidos grasos y aminoácidos. El método de secado al sol, por ejemplo, conduce a altas cantidades de compuestos fenólicos y manitol, y bajas cantidades de fucoxantina y monosacáridos que el secado en frío (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

3.5 Distribución geográfica

Las especies del género *Sargassum* están ampliamente distribuidas en áreas templadas y tropicales y están ausentes en los dos círculos polares (Stiger-Pouvreau et al., 2023). Mientras que las especies holopelágicas, *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*, sólo habitan el océano Atlántico (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

El Mar del Sargazo ha existido en el océano Atlántico desde hace siglos, ya que esteras flotantes de sargazo holopelágico fueron reportadas por primera vez por Cristóbal Colón en el Siglo XV (Wang et al., 2019). Por lo tanto, las especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* se habían centrado en el Mar del Sargazo, siendo abundante en esta región y con menores cantidades arribando en las costas de los países del Océano Atlántico (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

Sin embargo, una nueva distribución de sargazo holopelágico, llamada Cinturón del Sargazo, ha sido observada en imagen satelital desde el 2011, extendiéndose desde África occidental hasta el Golfo de México (Wang et al., 2019), siendo la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte (NERR por sus siglas en inglés) una fuente de origen (Theirllynck et al., 2023), como se muestra en la Ilustración 1.

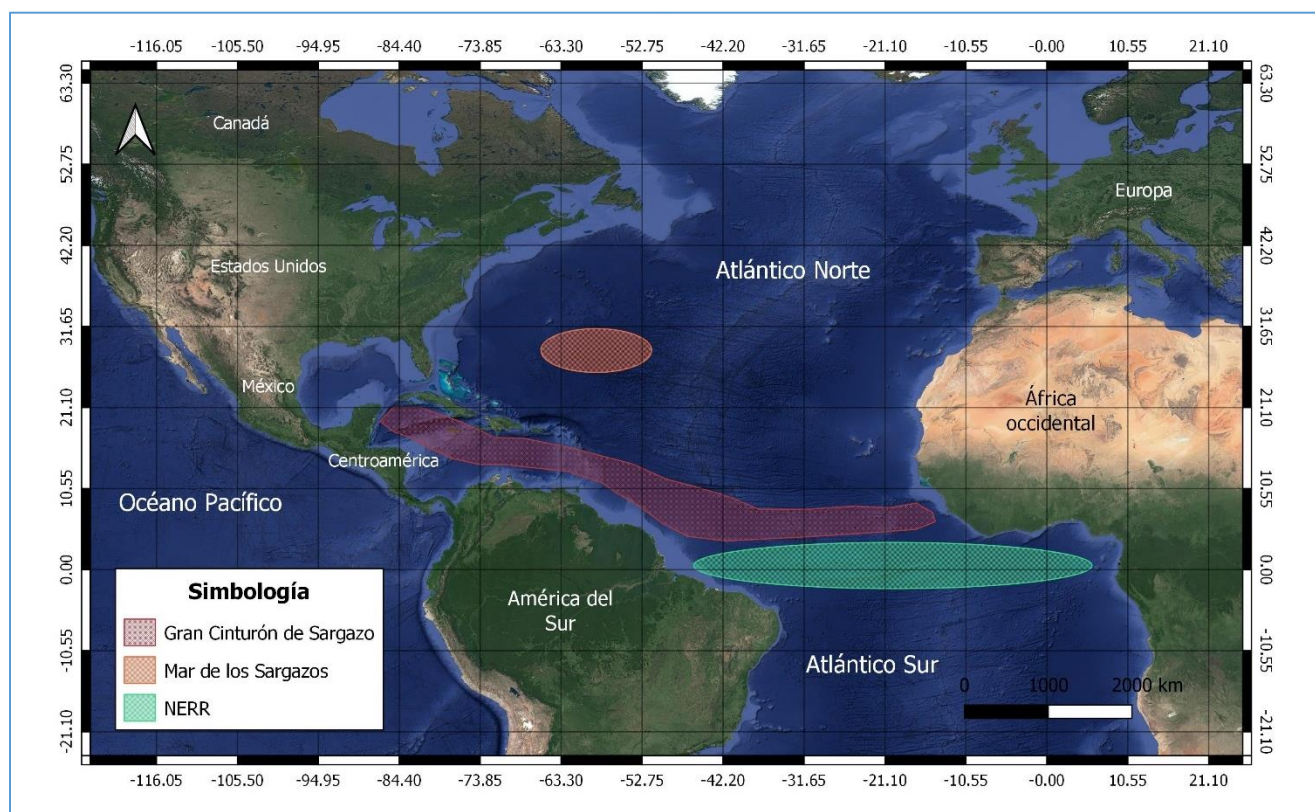


Ilustración 1. Mapa de la distribución del sargazo holopelágico

Se han formado varias hipótesis acerca de las crecientes acumulaciones del sargazo holopelágico, una de ellas es el aumento de nutrientes de nitrato y fosfato suministrado por los ríos Amazonas y Congo, debido a la deforestación y actividades agroindustriales (Theirllynck et al., 2023). Otra hipótesis es el aumento de la temperatura en la superficie del océano, alcanzando así una temperatura óptima para su crecimiento (Theirllynck et al., 2023).

Además, el sargazo holopelágico puede ser transportado desde el Mar de Sargazo a la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte debido a anomalías en el fenómeno climático de la Oscilación del Atlántico Norte, creando una población de semillas que causan los afloramientos de sargazo (Theirllynck et al., 2023).

Dichos afloramientos masivos de sargazo holopelágico empezaron en el año 2011 en el norte del Océano Atlántico y desde entonces se han presentado de forma estacional (Changeux et al., 2023). En las costas del Caribe mexicano las acumulaciones comenzaron en 2014, y han

ocurrido anualmente desde el 2018 con un alto volumen de sargazo que dura de cinco a siete meses (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

En el año 2018, observaciones satelitales confirmaron la formación del Gran Cinturón Atlántico del Sargazo, con una biomasa estimada de 20 millones de toneladas en el mes pico de ese año (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

Así, las especies *Sargassum natans* (genotipo I y VIII) y *Sargassum fluitans* (genotipo III) han formado grandes acumulaciones en las costas occidentales de África, el Caribe y el norte de Brasil (Theirlynck et al., 2023).

Aunque, de forma general, las especies del género *Sargassum*, tanto béntico como pelágico, pueden llegar a las playas en eventos conocidos como “marea dorada” (Devault et al., 2021).

3.6 Impacto

El aumento de esta macroalga en el océano Atlántico está relacionada con el cambio climático y la eutrofización de los océanos, y ha ocasionado problemas económicos, ambientales y de salud desde que comenzaron los arribazones de sargazo holopelágico en los países caribeños.

En las últimas cuatro décadas se había reportado el deterioro de la salud de los ecosistemas costeros, debido a distintos factores como el turismo, urbanización, cambio climático, sobre pesca, enfermedades de corales, contaminación del agua marina y, recientemente, acumulación masiva de sargazo (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

3.6.1 Descomposición

El sargazo holopelágico a la deriva llega a la zona costera, acumulándose y descomponiéndose. La descomposición de la biomasa de sargazo acumulada en la línea costera produce lixiviados y partículas de materia orgánica, que generan una marea marrón y, de acuerdo con Van Tussenbroek et al., 2017, se caracteriza por el trastorno de parámetros fisicoquímicos, como se menciona en la tabla 4.

Tabla 3. Desajuste de parámetros fisicoquímicos

Incremento	Reducción
Turbiedad	Oxígeno disuelto (OD)
Temperatura	pH
Azufre y amoníaco	Luz
Nutrientes	Flora
Materia orgánica en los sedimentos	Fauna

Esta marea marrón deteriora la calidad del agua marina y crea condiciones similares a la eutroficación (Antonio-Martínez et al., 2020). Cuando el sargazo se descompone en aguas poco profundas se crean zonas costeras muertas (van Tussenbroek et al., 2017).

Además, la descomposición del sargazo en ausencia de oxígeno puede generar H_2S (Chávez-Guerrero et al., 2021), que tiene un olor un fétido y es un gas tóxico, que puede ocasionar la muerte en animales y humanos.

Por otra parte, las grandes acumulaciones de sargazo flotante en mar abierto, son una amenaza para los organismos bénticos, ya que dependen de la luz solar para la fotosíntesis (León-Pérez et al., 2023).

3.6.2 Pastos marinos y arrecifes

Si bien, el sargazo holopelágico (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*) en mar abierto proporciona un hábitat importante para gran cantidad de especies, también es un peligro para la diversidad biológica cuando se acumula en grandes cantidades.

Como se mencionó anteriormente, los lixiviados y el material orgánico particulado, producto de la descomposición del sargazo, provocan cambios negativos en el agua de mar y por ende afectan a los ecosistemas marinos. Por ejemplo, estos cambios han ocasionado mortalidad en las praderas de los pastos marinos y comunidades coralinas (van Tussenbroek et al., 2017).

Durante la marea marrón, los pastos marinos y corales se encuentran bajo estrés debido a la reducción de luz y oxígeno disuelto, causando anoxia o hipoxia (van Tussenbroek et al., 2017).

De acuerdo con Van Tussenbroek et al. en 2017, se ha observado que cuando desaparece la marea marrón los pastos marinos y algunas colonias de corales se pierden, además del crecimiento de epifitas.

Asimismo, en el Caribe Mexicano muchas especies coralinas habitan arrecifes en lagunas costeras, donde los lixiviados del *Sargassum* pelágico se dispersan desde la línea costera hacia los arrecifes (Antonio-Martínez et al., 2020).

Por otra parte, los arribazones y descomposición del sargazo han tenido lugar durante el desove de corales (Antonio-Martínez et al., 2020). Las larvas de coral en contacto de los lixiviados del sargazo se ven afectadas, ya que reducen su velocidad de nado y por lo tanto su dispersión larval (Antonio-Martínez et al., 2020). En consecuencia, los lixiviados de sargazo afectan la fecundidad, asentamiento, embriogénesis, y reproducción de las larvas de coral, dañando su diversidad genética (Antonio-Martínez et al., 2020).

Los arribazones de sargazo y los cambios provocados por su descomposición y acumulación no sólo han afectado a los corales y pastos marinos, sino también han ocasionado mortalidad de fauna, incluidas especies de importancia económica como langostas y peces (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

Además, el *sargazo* varado puede restringir el acceso a sitios de anidación de tortugas y evita el calentamiento de los nidos por la luz solar (lo cual es bueno), sin embargo, cuando comienza a descomponerse genera una temperatura letal, afectando la eclosión de los huevos (Olguin-Maciel et al., 2022).

3.6.3 Patógenos

Se puede decir que, la mayoría de los impactos del sargazo en los ecosistemas y la salud de las personas, están asociados al proceso de descomposición de esta macroalga cuando queda varada a lo largo de la costa (León-Pérez et al., 2023). Incluso, estas acumulaciones de sargazo facilitan el crecimiento de bacterias que normalmente no abundan en las regiones costeras (Theirylnck et al., 2023).

Como se había mencionado, sargazo holopelágico alberga microorganismos y bacterias potencialmente patógenas de las familias *Pseudomonadaceae*, *Rhodobacteraceae* y *Vibrionaceae* que pueden producir enfermedades a humanos y especies marinas.

Además de las bacterias mencionadas, el sargazo holopelágico tiene hidroides adheridos a sus hojas, que ocasionan erupciones cutáneas (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Los hidroides son pequeños animales acuáticos, pertenecientes al grupo taxonómico donde se encuentran corales, anémonas, medusas y pólipos (Carral Murrieta et al., 2023).

3.6.4 Contaminantes

Los lixiviados de la descomposición del sargazo, no solamente provocan los cambios químicos en el agua costera antes mencionados, como reducción de pH, oxígeno disuelto y luz, o el incremento de la turbiedad, temperatura, materia orgánica y nutrientes. Sino que también, algunos contaminantes como metales pesados pueden moverse a través de los lixiviados y contaminar las aguas costeras y acuíferos, e incluso entrar a la red alimentaria de los ecosistemas costeros, afectando a los organismos que se alimentan de él (Rodríguez-Martínez et al., 2023)(Dassié et al., 2022).

Por ejemplo, los lixiviados generados durante la descomposición de *sargazo* tanto en las playas como en sitios de disposición final, representan un alto riesgo de contaminación en el sistema de aguas de la Península de Yucatán, debido al alto contenido de arsénico y la presencia de metales pesados (Olguin-Maciel et al., 2022).

Los contaminantes encontrados en estos lixiviados son metales pesados como el cadmio, plomo, mercurio y arsénico (Rodríguez-Martínez et al., 2023) y otros contaminantes como metilmercurio (MeHg), metano, ácido láctico, amonio y fósforo (Antonio-Martínez et al., 2020).

La concentración por metales pesados en las algas marrones, es proporcional a la cantidad de metales en el agua de mar (Dassié et al., 2022). Es importante decir que, el sargazo holopelágico en el océano abierto no transporta cantidades significativas de metales o metaloides, y puede considerarse prístino antes de arribar al mar Caribe, con excepción del arsénico (Dassié et al., 2022). Sin embargo, el sargazo que arriba en las costas del Caribe ya se encuentra particularmente contaminado con arsénico (Dassié et al., 2022).

El contenido de arsénico es el más destacado de entre todos los metales pesados debido a la fitoacumulación de éste, por confusión del transportador de fosfato entre el arsénico y el fosfato (Devault et al., 2021), como se había mencionado con anterioridad. De acuerdo con Stiger-Pouvreau et al., 2023, las algas marinas concentran el ion (AsO_4^{3-}), que es la principal forma del arsénico en el agua de mar, probablemente por su similitud con el nutriente ion fosfato (PO_4^{3-}). Por lo tanto, la concentración total de arsénico en las algas marinas es alta, con un intervalo de 10-100 mg kg⁻¹, y en el caso del sargazo holopelágico alcanzando 200 mg kg⁻¹ (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Mientras que la mayoría de las algas marinas convierten el arsénico inorgánico en formas orgánicas menos tóxicas como azúcares de arsénico, el sargazo holopelágico lo acumula como arsénico inorgánico (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Ha sido observado que el sargazo holopelágico es capaz de concentrar clordecona (Stiger-Pouvreau et al., 2023). Pero en general, los contaminantes orgánicos del sargazo holopelágico han sido poco documentados (Devault et al., 2021), además, estos pueden ser absorbidos por los organismos debido a sus propiedades físicas como la relación superficie/volumen (Devault et al., 2021).

3.6.5 Arribazones

Los afloramientos de las especies del género *Sargassum* no son nuevos, por ejemplo desde los años 2000 afloramientos del alga marrón *Sargassum horneri* también han ocurrido en el Mar Amarillo del este de China, afectando actividades económicas como la pesca, acuicultura y recreación (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

En el caso del sargazo holopelágico (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*) los afloramientos en el océano Atlántico tropical comenzaron en el año 2011 (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Extendiéndose desde las costas de África hasta el Mar Caribe y el Golfo de México, incluso llegando a América Central, Brasil y Florida (van Tussenbroek et al., 2017).

Desde entonces los arribazones de sargazo han ocasionado problemas ecológicos, económicos y de salud humana en alrededor de 30 países (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Una problemática derivada de la llegada de sargazo a las playas, son los varamientos de basura a lo largo las costas de todo el Atlántico norte, el mar Caribe, el Golfo de México, Sudamérica y las costas del Este de África (Changeux et al., 2023).

En el caso de las costas mexicanas un promedio de 9726 m³ de sargazo se acumularon por mes por kilómetro de costa, en julio y agosto de 2015 (van Tussenbroek et al., 2017). Durante ese tiempo, alrededor de 4400 trabajadores fueron empleados para remover esta macroalga de las secciones de playa turísticas. Sin embargo, en el 90% de la línea costera, el alga no fue removida (van Tussenbroek et al., 2017).

En el norte de la costa del Caribe Mexicano, 524 toneladas fueron removidas mensualmente por kilómetro en 2018 (Carrillo-Domínguez et al., 2023). Otro ejemplo es Brasil, donde 614 toneladas de sargazo arribaron en un día por kilómetro en el año 2015 (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

Los arribazones masivos de sargazo pueden volverse un evento anual (Chávez-Guerrero et al., 2021), lo cual ha estado ocurriendo desde el 2018 (Rodríguez-Martínez et al., 2023). La llegada del sargazo ocurre de cinco a siete meses durante la primavera y el verano, cuando los vientos del este y sudeste son predominantes (Rodríguez-Martínez et al., 2023), posiblemente influenciados por la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte (NERR).

La temporada de llegada del sargazo incrementa los daños económicos y ambientales, debido a que la descomposición se da durante los meses más calurosos, reduciendo el turismo.

En México, los volúmenes de sargazo parecen estar incrementando con el tiempo, ya que se han reportado valores que van desde 2360 m³ por kilómetro en 2015 a 3816 m³ por kilómetro en 2018, y 6565 m³ por km en 2019 (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

El volumen anual de sargazo recolectado en las costas del Caribe mexicano va desde 10,105 a 40,932 m³ por kilómetro, resultando en 0.3 a 1.1 millones de dólares en costos de limpieza por kilómetro (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Por cada kilómetro de playa se han llegado a acumular desde 15 mil hasta más de 100 mil m³ de sargazo, cuyo costo de limpieza ha llegado a ser de 1.5 millones de dólares por kilómetro (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

Los costos de limpieza del sargazo en el Caribe han sido estimados en 210 millones de dólares (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

La acumulación del alga en las playas, malos olores y cambios en la calidad del agua de las costas resultan en la devaluación de las propiedades de las playas y en una reducción de los visitantes, afectando la economía de muchos países (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

Además, el sargazo es removido de las playas con maquinaria, lo que contribuye a la erosión y compactación de las playas (van Tussenbroek et al., 2017). Más aún, el alto contenido de humedad del sargazo dificulta el transporte, almacenamiento y uso (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

La limpieza y mitigación del sargazo pelágico en las playas y aguas costeras es costosa, pero no tanto como el costo de la inacción, que resulta en consecuencias mayores (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Actualmente los esfuerzos por detectar acumulación de sargazo en y cerca de la costa, son limitados (León-Pérez et al., 2023).

Por todo lo anterior, el sargazo es considerado una plaga ecológica que causa impactos económicos adversos para el turismo y la pesca en el Caribe (Paraguay-Delgado et al., 2020). La ausencia de turistas a causa de la acumulación del sargazo puede ocasionar desempleo y problemas sociales, incluyendo aumento del crimen y pobreza (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

Algunos efectos negativos perjudican la industria de la pesca, debido a que el sargazo obstruye la operación de los botes de pesca y dificulta el acceso a especies de importancia económica (Castro et al., 2022).

3.6.6 Salud humana

Se puede decir que, el mayor impacto social y ambiental de los arribazones de sargazo holopelágico, es su proceso de descomposición a lo largo de la costa (León-Pérez et al., 2023). Después de 48 horas la descomposición del sargazo libera sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico) nocivo para la salud humana, que puede causar problemas neurológicos, digestivos y respiratorios en las poblaciones cercanas (León-Pérez et al., 2023).

Estas sustancias son conocidas por ocasionar problemas de salud en los seres humanos como síndrome de dificultad respiratoria, lesiones en el tracto respiratorio y pulmones, hipoxia y cianosis (Castro et al., 2022). Además, la actividad bacteriana genera otros gases que también pueden ser dañinos a la salud humana (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

3.7 Aplicaciones potenciales

Las algas marinas en general presentan distintos beneficio aplicables a diferentes ramas industriales, ya sea de producción o de servicios ambientales.

Las algas marinas tienen la capacidad de capturar dióxido de carbono de la atmósfera, globalmente pueden secuestrar entre 61 y 268 megatoneladas de carbón por año, con un promedio de 173 megatoneladas (Farghali et al., 2023). Cerca del 90% del carbón es secuestrado por la exportación de biomasa a aguas profundas, mientras que el 10% remanente es enterrado en sedimentos costeros (Farghali et al., 2023). Las algas marinas (bénticas u holopelágicas) transportan el carbono secuestrado a las profundidades del océano, al desprenderse del lecho marino o al perder su flotabilidad (Farghali et al., 2023). Las algas marinas pueden ser utilizadas como un buen indicador de polución para el agua marina circundante de una región en particular (Seepersaud et al., 2018), como el incremento de nutrientes.

Las algas marinas pueden convertirse en productos de alto valor, como biocombustibles, utilizando la digestión anaerobia y la fermentación (Farghali et al., 2023). Las algas marinas pueden acumular una gran cantidad de lípidos y carbohidratos durante su crecimiento, que las hace adecuadas para la producción de biocombustibles (Anand et al., 2023). La hidrólisis de la biomasa de algas marinas genera ácidos grasos volátiles y promueve la producción de metano (Farghali et al., 2023).

Además, las algas marinas presentan diferentes tipos de metabolismos como el autótrofo, mixotrófico y heterótrofo, los cuales pueden ser usados para tratar diferentes tipos de residuos. Asimismo, la biomasa de las algas puede ser aprovechada debido a su rápido crecimiento (Anand et al., 2023).

De este modo, los productos que se pueden generar con la biomasa de las algas pueden ser pigmentos, proteínas, ácidos grasos poliinsaturados, biocombustibles, biofertilizantes, biocarbón, y alimento animal, los cuales pueden ser utilizados en diferentes ramos industriales (Anand et al., 2023).

Las algas en general pueden utilizarse en el tratamiento de aguas residuales, actuando como floculantes, y así aumentar la velocidad de sedimentación (Anand et al., 2023).

Además, las algas pueden secretar metabolitos secundarios que inhiben el crecimiento de organismos patógenos (Anand et al., 2023). Estos exudados extracelulares son sustancias antibacteriales, nutrientes y quimioatrayentes, que regulan la población de las bacterias (Anand et al., 2023). Aunque, la adhesión entre células de algas y de bacterias permite el establecimiento de una comunidad entre algas y bacterias (Anand et al., 2023).

Por otra parte, las algas marrones son conocidas por absorber cantidades variables de sustancias inorgánicas del medio circundante, dependiendo de la zona geográfica y la especie (Chávez-Guerrero et al., 2021).

Los óxidos de magnesio y calcio pueden encontrarse en grandes cantidades, así como otros elementos en menor cantidad como Na, Si, Al, K, P (Chávez-Guerrero et al., 2021).

Las algas marrones, como el género *Sargassum*, acumulan metales pesados y la concentración en sus paredes celulares pueden ir desde 20,000 hasta 40,000 veces más que en el agua que las rodea (Dassié et al., 2022). Igualmente, la adsorción de fenoles en la superficie de las algas se produce por la interacción de puentes de hidrógeno con los grupos hidroxilo de los polisacáridos de las algas, como los alginatos (Farghali et al., 2023).

En el caso del sargazo holopelágico, la concentración de arsénico merece especial atención, porque si bien puede variar en el intervalo de 1 a 225 ppm (dependiendo de los morfotipos), la mayoría de los estudios han reportado valores que exceden el límite permitido, para uso de algas con propósitos nutricionales en la mayoría de los países (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

De forma particular, el sargazo holopelágico es capaz de absorber elementos tóxicos como arsénico, cadmio, plomo y mercurio (Rodríguez-Martínez et al., 2023)* así como otros contaminantes como la clorodecona (Rodríguez-Martínez et al., 2023)*, debido a los alginatos y fucooidanos en su pared celular que sirven como sitios de enlace para metales y semi-metales (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

Sin embargo, es importante mencionar que, altos niveles de arsénico y otros elementos tóxicos, como el cadmio, dificultan el uso de la biomasa del *sargazo* directamente como biofertilizante, composta, o alimento de animales (Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Asimismo, al momento de analizar contaminación por metales en agua de mar, hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

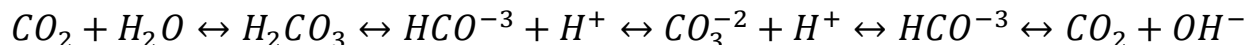
- 1) la concentración de metales está cerca del límite de detección
- 2) las algas marinas sólo acumularán aquellos metales que sean biológicamente viables
- 3) las algas (y las plantas en general) sólo acumulan aquellos metales que están presentes en solución en comparación con los metales particulados (Seepersaud et al., 2018).

Por otra parte, así como las algas marinas en general, el sargazo holopelágico captura CO₂, y lo hace en al menos tres formas (Paraguay-Delgado et al., 2020). La primera a través de la fotosíntesis, pero una vez que se degrada la biomasa se produce nuevamente CO₂, que regresa al ciclo del carbono (Paraguay-Delgado et al., 2020).

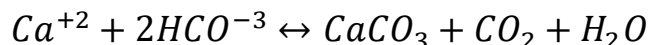
La segunda forma es indirecta, por medio de la gran cantidad de macrofauna móvil y adherida que alberga el sargazo, como los moluscos, que atrapan el CO₂ a través de la formación de sus conchas, que consisten principalmente en calcita (Paraguay-Delgado et al., 2020).

La tercera forma es a través de la fijación de CO₂ con la producción interna de carbonato de calcio en la forma de calcita (Paraguay-Delgado et al., 2020).

Como se sabe, el CO_2 de la atmósfera es altamente soluble en el agua de mar y produce iones de carbonato y bicarbonato de acuerdo con la siguiente ecuación:



Añadiendo la calcificación del alga:



Por lo que, estas especies de algas han contribuido en la formación de grandes sedimentos de CaCO_3 que posteriormente se convierten en rocas sedimentarias (Paraguay-Delgado et al., 2020)*.

En un estudio realizado por Chávez-Guerrero et al. en 2021, se menciona la obtención de carbonato de calcio por combustión directa del sargazo, a través de las cenizas que representaron el 12%. Esto significa que, obtener CaCO_3 del alga reduce la dependencia en la industria de piedra caliza natural, que causa contaminación por las minas de campo abierto (Chávez-Guerrero et al., 2021).

En pocas palabras, el sargazo en mar abierto puede fijar el CO_2 de la atmósfera y convertirlo en calcita, convirtiéndose después en roca sedimentaria (Paraguay-Delgado et al., 2020).

Por otro lado, como es el caso de las algas marinas, una de las aplicaciones más prácticas del sargazo holopelágico es la digestión anaerobia (Castro et al., 2022). La energía potencial de la biomasa marina es casi cinco veces mayor que la biomasa terrestre, y más de diez veces mayor que los residuos sólidos municipales (Castro et al., 2022)*.

De acuerdo con Carrillo-Domínguez et al. en 2023, el sargazo holopelágico puede utilizarse como suplemento en la alimentación animal si se añade como ingrediente en concentraciones menores a 5%, debido a que sus componentes minerales, elementos traza, aminoácidos y ácidos grasos benefician la salud animal.

Aunque es importante mencionar que una limitación significativa para el uso como suplemento alimenticio es la capacidad del sargazo holopelágico de absorber elementos potencialmente tóxicos (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

En resumen, la valorización del sargazo holopelágico como alimento, biocombustible, material de construcción, o productos farmacéuticos es una ventaja ante los costos asociados a su remoción y manejo (Carrillo-Domínguez et al., 2023).

3.8 Mecanismos de sorción

El término sorción es un mecanismo de transferencia líquido/sólido, y es un término genérico para referirse a la acumulación de especies disueltas sobre una superficie o dentro de un material (Worch, 2015). Esto incluye los procesos superficiales como la adsorción e intercambio iónico, así como procesos en el interior de una fase sólida como la absorción (Worch, 2015).

La absorción consiste en una transferencia de masa de una sustancia dentro de otra, que se encuentra en diferente fase; mientras que la adsorción es una transferencia de masa que ocurre en la superficie de una sustancia.

Debido a que la absorción sucede en casos específicos, se puede decir que los procesos de sorción abarcan principalmente procesos superficiales (Worch, 2015). En general, a la fase sólida que recibe las moléculas se le llama sorbente, y la sustancia que será sorbida, se le denomina sorbato (Worch, 2015).

Asimismo, el proceso inverso de la sorción es la desorción, y consiste en la liberación de las especies acumuladas hacia la fase acuosa (Worch, 2015). La figura 4 ilustra los procesos de sorción:

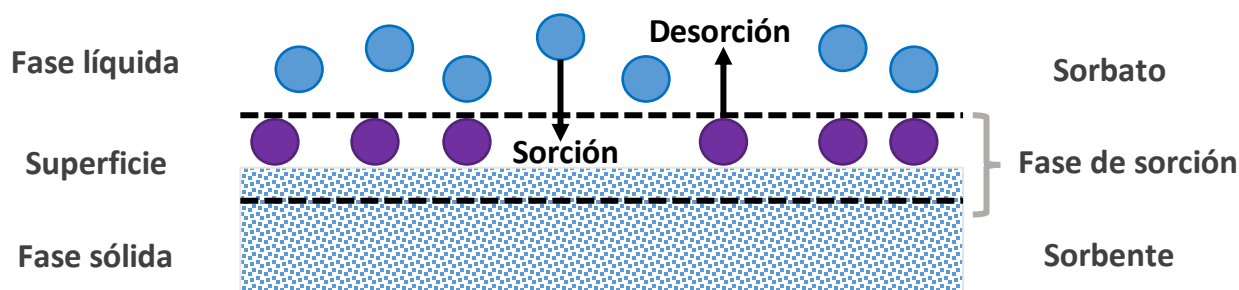


Figura 4. Mecanismos de sorción

Un ejemplo de sorción es el ciclo del agua, en donde la sorción inmoviliza los constituyentes disueltos del agua para su auto purificación (Worch, 2015). En una fase acuosa, la sorción ocurre en todos los sitios donde hay contacto con el material sólido (Worch, 2015).

Independientemente del tipo o mecanismo de sorción, los equilibrios de sorción pueden describirse mediante isotermas de sorción. Se puede decir que, las isotermas de sorción relacionan la cantidad sorbida q_e con la concentración C_e en la fase líquida, en el equilibrio y a una temperatura constante (Worch, 2015).

Lo anterior se puede calcular con la siguiente ecuación de balance de materia:

$$q_e = \frac{V}{m_{\text{sorbente}}} (C_0 - C_e) \quad \text{Ec (1)}$$

Donde:

- q_e es la relación entre la cantidad sorbida y la concentración en la fase líquida, (mg/g)
- V es el volumen de la solución
- m es la masa del sorbente
- C_0 es la concentración inicial de sorbato
- C_e es la concentración de sorbato en el equilibrio

El tiempo de equilibrio se puede conocer experimentalmente, variando las concentraciones iniciales de sorbato y dejando actuar hasta que no haya variación en su concentración después de un tiempo determinado.

Es importante resaltar que, cuando se utiliza como sorbente un material biológico para la remoción de alguna sustancia de un medio acuoso, se dice que es un proceso de **biosorción** (Michalak et al., 2013). Normalmente la biosorción es un tipo de adsorción (Michalak et al., 2013).

3.9 Adsorción

La adsorción, a diferencia de la absorción, es un fenómeno superficial. Es decir, la adsorción es el mecanismo de sorción referida a fenómenos superficiales de transferencia de masa.

En otras palabras, la adsorción es un fenómeno físico de unión o adherencia entre moléculas y iones de una sustancia sobre una superficie sólida (Michalak et al., 2013), a diferencia de la absorción, que consiste en la transferencia de un soluto de una fase gaseosa a una fase líquida (Wilcox, J. 2012).

Los mecanismos de adsorción pueden ser clasificados como adsorción física o química (Hesketh, 1979) (VanGuilder, Cliff 2018). La diferencia radica en los vínculos que forman las moléculas o especies disueltas con el material sólido, siendo estos vínculos fuerzas electrostáticas (Van Der Waals) o enlaces químicos. Por ejemplo, el enlace químico es mediante una reacción con la superficie del adsorbente (Hesketh, 1979).

Debido a que la adsorción es un fenómeno superficial, una propiedad importante para el grado de adsorción es el área superficial del adsorbente (Worch, Eckhard 2012) (Worch, 2021). Entre mayor sea el área superficial de un adsorbente, más grande será su capacidad de adsorción (Romanò et al., 2020). La capacidad de adsorción de un material también depende en gran parte de sus características porosas (Romanò et al., 2020), así como de la concentración del adsorbato presente en el medio.

Por ejemplo, en el caso de los gases, la capacidad de sorción incrementa al aumentar la concentración del gas (Romanò et al., 2020). Si la concentración de entrada de un gas decrece, el adsorbente no podrá mantener la misma capacidad de sorción (o adsorción) y algunas moléculas pueden ser liberadas (Romanò et al., 2020).

En el caso de la adsorción química, la capacidad de adsorción depende de la cantidad de impregnación del químico y la adsorción continuará tanto como los químicos permanezcan (Romanò et al., 2020). Una vez adsorbidos, algunos adsorbatos pueden reaccionar aún más para unirse covalente e irreversiblemente (Roy et al., 2019).

La adsorción llevada a cabo por suelos y sedimentos pueden remover solventes disueltos en el agua (Roy et al., 2019). Un fenómeno observado frecuentemente en estudios de adsorción y desorción de pesticidas con suelos, es la *histéresis* (Roy et al., 2019), y consiste en la conservación de una propiedad sin el estímulo o factor que la produjo.

3.9.1 Adsorbentes

Existen distintos tipos de adsorbentes usados para el tratamiento de agua, estos pueden ser de origen natural, industrial, o provenir de un proceso de activación (Worch, 2021).

Los adsorbentes de origen natural son minerales de arcilla, zeolitas, óxidos o biopolímeros (Worch, 2021). Mientras que los provenientes de un proceso de activación son el carbón activado, que es el adsorbente más común para la remoción de materia orgánica (Golderberg & Min, 2007).

Asimismo, la propiedad más importante de un adsorbente son las áreas superficiales por unidad de volumen (Hesketh, 1979). Los adsorbentes naturales tienen áreas superficiales mucho más pequeñas que los adsorbentes fabricados, que poseen mayor capacidad de adsorción (Worch, 2021). Una alternativa de adsorbentes de bajo costo son los desechos o subproductos de otros materiales (Worch, 2021).

Debido a que en los procesos de adsorción se llevan a cabo entre una fase líquido/sólido o gas/sólido, generalmente las partículas sólidas de adsorbente son altamente porosas con una gran superficie de volumen (Golderberg & Min, 2007).

3.10 Isotermas

El comportamiento de los mecanismos de sorción de sustancias está descrito por la relación entre la concentración del adsorbato C_e , y la cantidad de adsorbente (Krop et al., 2020). Las isotermas descritas a continuación modelan procesos de sorción en general, es decir, se pueden ocupar tanto para adsorción como para absorción.

Los modelos de isotermas más comunes son los de Henry, Langmuir, Freundlich y Temkin (Khan et al., 2021). Otros modelos de isotermas son el modelo de BET (Brunauer-Emmett-Teller) y el modelo de GAB (Guggenheim-Andersson-DeBoer) (Moghal et al., 2017). Todos estos modelos pueden aplicarse de forma lineal o no lineal, para encontrar sus parámetros.

3.10.1 Langmuir

La isoterma de Langmuir relaciona la adsorción de un soluto (adsorbato) con un número fijo de sitios únicos de adsorción o un máximo de masa adsorbida por el adsorbente (Krop et al., 2020)(Worch, 2015).

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{Ec (2)}$$

Donde:

- q_e es la capacidad de sorción o adsorción (mg/g)
- C_e es la concentración de adsorbato en el equilibrio (mg o mmol / L)
- K_L es la constante de sorción de Langmuir (L / mg o mmol)
- q_m es el la máxima capacidad de adsorción (mg/g)

La isoterma de Langmuir se representa de la forma mostrada en la figura 5.

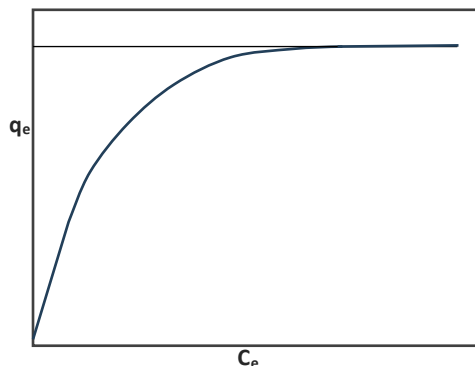


Figura 5. Isoterma de Langmuir

A bajas concentraciones, el producto $K_L C_e \ll 1$, por lo que la Isoterma de Langmuir se reduce a una forma lineal:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1}$$

$$q_e = q_m K_L C_e \quad \text{Ec (3)}$$

Que es equivalente a la Isoterma de Henry, (Worch, 2015).

Mientras que, a altas concentraciones, el producto $K_L C_e \gg 1$, lo que resulta en:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{K_L C_e}$$

$$q_e = q_m \quad \text{Ec (4)}$$

La isoterma de Langmuir es una de las más utilizadas. Sin embargo, de acuerdo con Worch en 2015, a veces no es adecuada para describir los datos experimentales de soluciones acuosas.

3.10.2 Freundlich

La isoterma de Freundlich consiste en una relación empírica entre C_e y q_e (Krop et al., 2020) (Worch, 2015), y se representa mediante la ecuación 5.

$$q_e = K_F * C_e^n \quad \text{Ec (5)}$$

Donde:

- $n < 1$ y determina la curvatura de la isoterma
- q_e es la capacidad de sorción o adsorción (mg/g)
- C_e es la concentración de adsorbato en el equilibrio (mg o mmol / L)
- K_F es la constante de sorción de Freundlich (mg/g) (Moghal et al., 2017)

Generalmente n toma el valor de una fracción, lo que permite su análisis dimensional: $n = \frac{1}{N}$

Esta isoterma no representa muy bien el comportamiento a concentraciones muy altas o muy bajas de adsorbato, pero si en rangos medios (Worch, 2015). Cuanto mayor sea el valor de la constante de Freundlich K_F mayor será la capacidad de sorción. Mientras que en el caso de n , cuanto menor sea su valor, más cóncava será la isoterma con respecto al eje de la concentración C_e (Worch, 2015).

Las diferentes formas de la isoterma de Freundlich se representan en la figura 6.

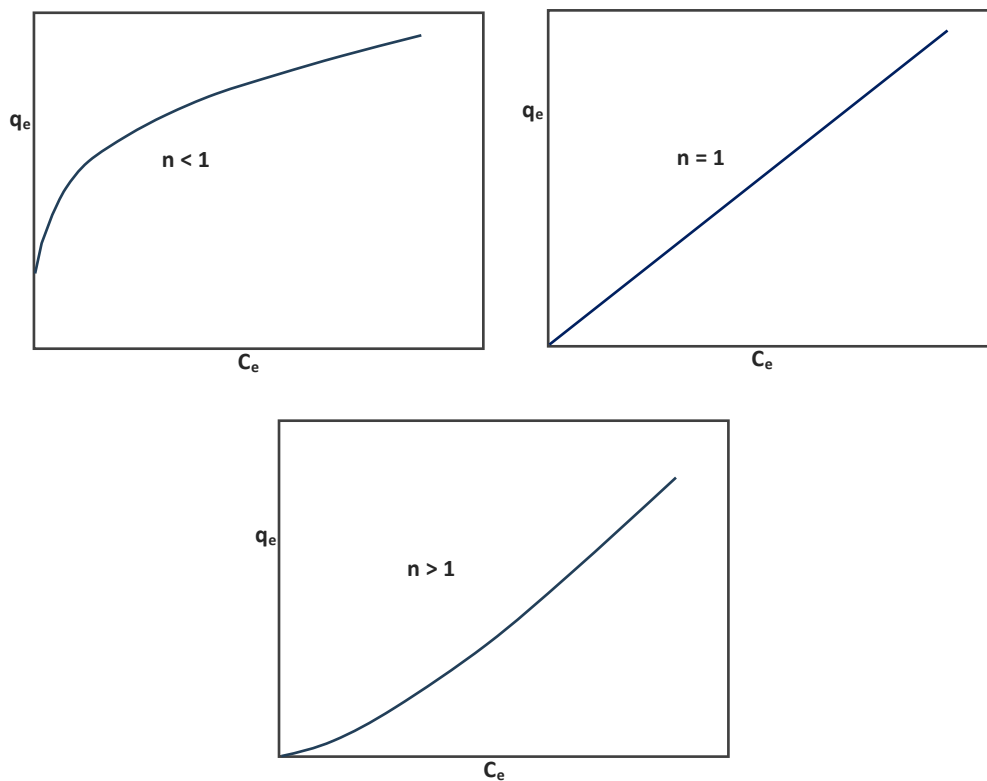


Figura 6. Isotermas de Freundlich

3.11 Diseño experimental

En esta sección se detallan los modelos matemáticos y estadísticos necesarios para el diseño experimental del presente proyecto. Los más importantes son los referentes al análisis de varianza, el diseño factorial de un experimento y el modelo de superficie de respuesta.

3.11.1 Análisis de Varianza

El análisis de varianza (ANOVA por sus siglas en inglés) es un procedimiento estadístico que sirve para probar la igualdad entre las medias (Montgomery, 2007). Su función radica en la prueba de una hipótesis experimental, la cual se expresa de manera numérica, y es aceptada o rechazada de acuerdo con el estadístico de prueba, los intervalos de confianza y el valor P.

El ANOVA sirve para contrastar numéricamente más de dos grupos de muestras (Devore, 2001), evitando arrastrar los errores si se realizara una prueba t. En este procedimiento, se utiliza una familia de distribuciones llamada distribuciones F , la cual utiliza este estadístico para la validación de hipótesis.

Uno de los supuestos más importantes para la prueba F de Fisher es que las muestras sean independientes una de la otra y que los datos estén distribuidos normalmente. La expresión del estadístico F es el cociente entre dos distribuciones X^2 cuadrada, las cuales se diferencian por los grados de libertad, como se muestra en la ecuación 6.

Ec. (6)

$$F = \frac{\frac{SCE}{m-1}}{\frac{SCD}{m(n-1)}}$$

Donde:

- SCE suma de cuadrados entre las muestras
- SCD suma de cuadrados dentro de las muestras
- m cantidad de muestras o grupos (número de columnas)
- n cantidad de elementos en cada muestra o grupo (número de filas)

En un ANOVA se estudian los efectos de la interacción entre factores cualitativos y cuantitativos con diferentes niveles. En esta prueba, se realiza el contraste de las varianzas o medias dentro y entre los grupos de muestras. La hipótesis nula (H_0) establece que todas las medias son iguales, mientras que la hipótesis alternativa (H_a) establece que al menos una media es diferente (Devore, 2001).

Los cálculos de este procedimiento estadístico se resumen en un formato tabular llamado *tabla ANOVA* (Devore, 2001).

3.11.2 Diseño factorial 2^k

Los diseños factoriales consisten en k factores con 2 niveles de prueba, llamados alto y bajo. Los factores son las variables o parámetros que se desean estudiar en un experimento. En un diseño factorial se estudia el efecto que tienen los factores sobre la variable de respuesta.

El efecto de un factor puede darse debido a un cambio en los niveles. La notación de Yates ayuda a visualizar las combinaciones o interacciones que tienen los niveles de los diferentes de factores, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Notación de Yates para los niveles

Notación de Yates	Niveles
(1)	(- , -)
b	(- , +)
a	(+ , -)
ab	(+ , +)

La cantidad total de observaciones en un diseño factorial está dada por 2^k . De tal forma que en un diseño factorial 2^2 , es decir, dos factores con dos niveles, las observaciones necesarias serían 4, como se muestra en la Figura 7.

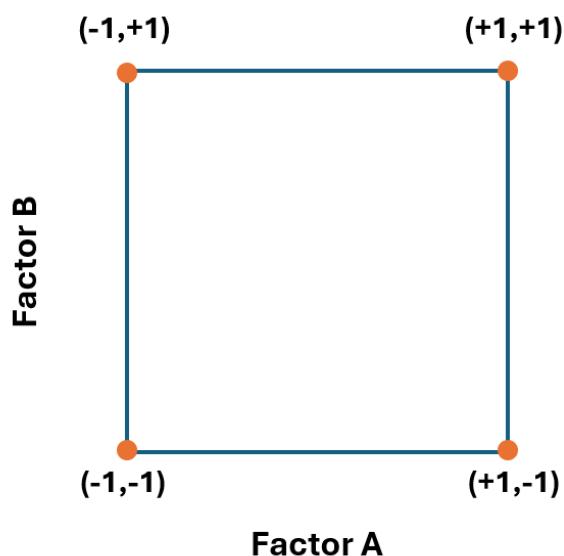


Figura 7. Combinaciones de los niveles

En el diseño factorial 2^k también es necesario hacer un resumen por medio de una tabla ANOVA, donde se muestra los efectos principales de cada factor y de las interacciones de los factores.

Es importante decir que, un diseño factorial se puede expresar por medio de un modelo de regresión, para un experimento con dos factores, la regresión estaría representada por la siguiente ecuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

- y es la variable de respuesta
- β son los coeficientes de regresión
- x_1 y x_2 son las variables codificadas
- ε es el error experimental

En este caso, una representación gráfica sería una superficie de respuesta plana, ya que la ecuación es de primer orden.

3.11.3 Diseño de Compuesto Central (DCC)

Existen situaciones en las que un diseño factorial puede mostrar cierta curvatura con un modelo de primer orden, pero no es suficiente para representarla, por lo que es necesario hacer un ajuste con una ecuación de segundo orden (ecuación 8):

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \varepsilon \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

- β_{12} es el coeficiente de interacción
- β_{11} y β_{22} son los coeficientes de los efectos cuadráticos
- x_1^2 y x_2^2 son las variables codificadas al cuadrado
- ε es el error experimental

Esto implica que se deben realizar más observaciones en el experimento, dando origen a un Diseño de Compuesto Central (DCC) como se muestra en la Figura 8.

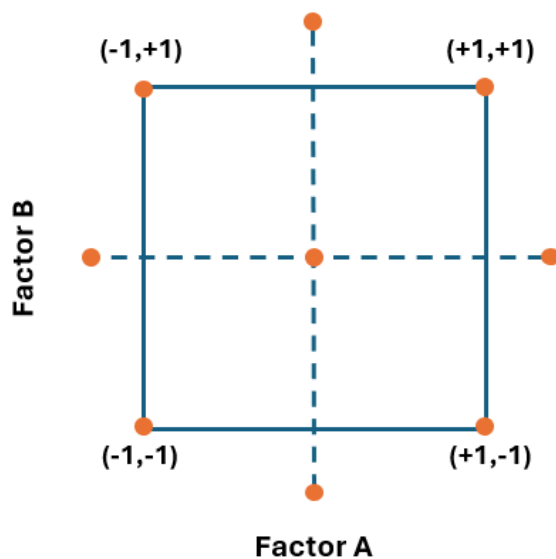


Figura 8. Diseño de Compuesto Central

Estos puntos adicionales ayudan a incluir la curvatura en un diseño factorial. La representación codificada para este diseño es la siguiente:

Tabla 5. Notación para los niveles del DCC

Diseño	Factor A	Factor B
Factorial	-1	-1
	+1	-1
	-1	+1
Compuesto Central	0	0
	$-\alpha$	0
	$+\alpha$	0
	0	$-\alpha$
	0	$+\alpha$

Donde $\alpha \pm \alpha$ son las distancias desde el centro codificado **(0,0)** a los nuevos puntos del diseño.

Es importante decir que, cuando se añaden puntos centrales y axiales en un diseño factorial, los factores en cuestión deben ser de tipo cuantitativo.

3.11.4 Superficie de respuesta

La superficie de respuesta es la representación gráfica de los modelos de regresión de los diseños factoriales. Ésta puede ser de primer orden o de segundo orden, dependiendo de si se presenta una curvatura con los datos del experimento.

Una superficie de respuesta de primer orden se vería plana como una hoja de papel, puesto que no hay una interacción con los factores que se están estudiando (figura 9).

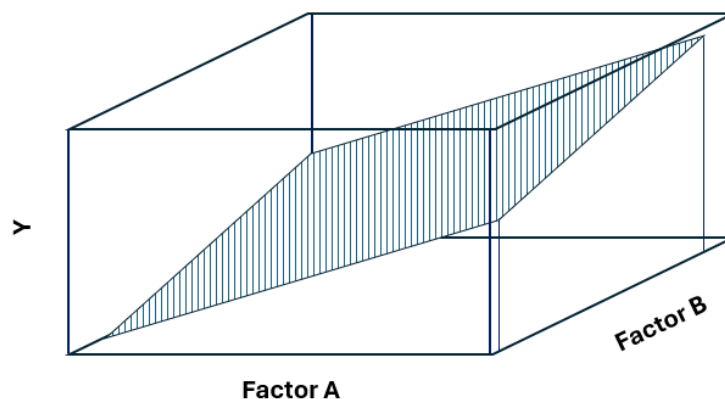


Figura 9. Superficie de respuesta de primer orden

En el caso de un modelo de regresión de segundo orden, la superficie de respuesta presentaría curvatura (figura 10).

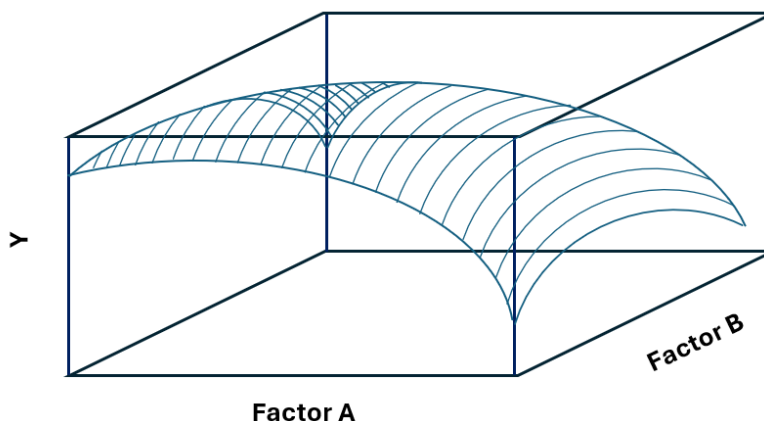


Figura 10. Superficie de respuesta de segundo orden

Las superficies de respuesta son importantes porque resumen gran parte del análisis numérico de un diseño factorial o un diseño de compuesto central. Ya que muestran los niveles de los factores estudiados, los valores de la variable de respuesta y si hay alguna interacción significativa entre los factores.

4 Metodología

4.1 Recolección de la muestra

Se colectó una muestra de sargazo holopelágico arribado en las costas de Playa del Carmen, Quintana Roo, México. La muestra del alga se recolectó y se guardó en un contenedor, que fue enviado a la Ciudad de México para su análisis y la realización del presente trabajo.

La ubicación de la zona de colecta del ejemplar de sargazo holopelágico se muestra en el mapa de la ilustración 2, realizados en el programa QGIS, el cual está enfocado a los Sistemas de Información Geográfica.

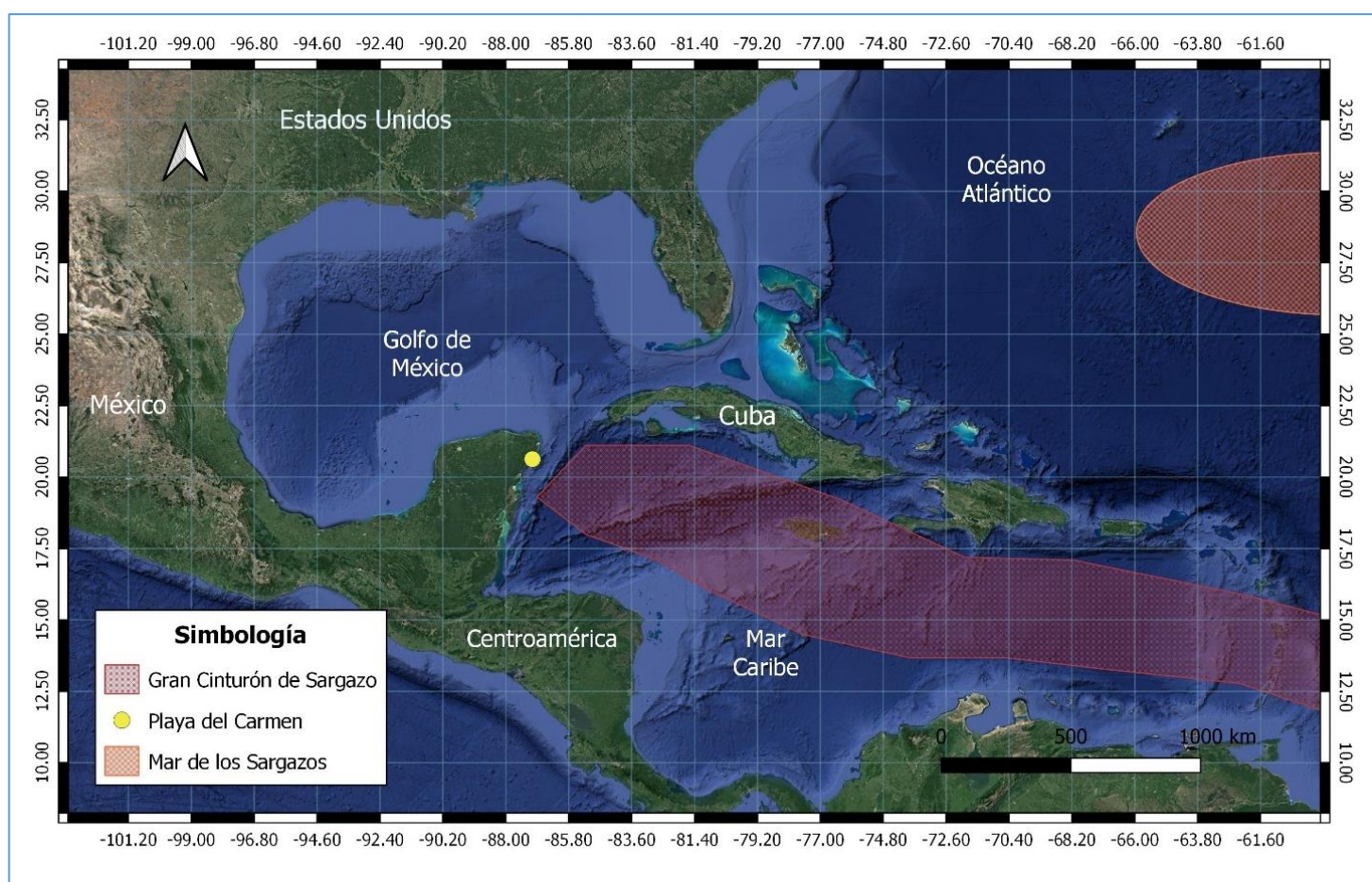


Ilustración 2. Mapa del sitio de muestreo

Como se puede observar, la muestra fue tomada en un sitio donde llegan los arribazones de sargazo anualmente por medio del Gran Cinturón de Sargazo.

4.2 Preparación de la muestra

La muestra del alga se sometió a dos ciclos de esterilización a 121°C por 20 minutos (Ilustración 3). Después pasó por un proceso de secado, primero al sol por 8 horas y después en la estufa por 5 horas a 60°C.

Una vez seca la muestra se procedió a moler y tamizar el alga; el tamiz usado fue del número 50, reportando un tamaño de partícula de 300 micrómetros. La muestra preparada se almacenó y se etiquetó para ser usada en el experimento.



Ilustración 3. Muestra de Sargazo holopelágico

Durante la preparación se observó en algunas de las hojas y vesículas del sargazo, un recubrimiento blanquecino de superficie rasposa, que posiblemente podría deberse a la presencia de hidroides. Los cuales, como se mencionó anteriormente son diminutos animales acuáticos, taxonómicamente relacionados con los corales, anémonas, medusas y pólipos.

4.3 Caracterización del sargazo

4.3.1 Espectro FTIR

La biomasa tamizada de sargazo fue analizada en la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, mediante técnica Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en la emisión de un haz de luz infrarrojo sobre las moléculas del material de interés, en este caso el sargazo holopelágico. El haz de luz rebota emitiendo longitudes de onda particulares de cada material, revelando de este modo los grupos funcionales que componen al material.

Los espectros FTIR fueron un promedio de 8 escaneos en un intervalo de $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$, con una resolución de 4 cm^{-1} .

4.3.2 Extracción de lípidos

Para la extracción de lípidos se instalaron dos sistemas de extracción Soxhlet conectados en serie. El sistema Soxhlet consistió en un matraz bola con perlas de ebullición a peso constante, un sifón y un refrigerante. El disolvente utilizado para la extracción fue n-hexano (C_6H_{14}).

A cada sistema se le colocó un cartucho o filtro con un gramo de biomasa aproximadamente. El sistema se selló con parafilm para evitar fugas y se colocó un algodón que permitiera la liberación del vapor de n-hexano. La extracción de lípidos tuvo una duración de 3 horas, 4:45 minutos por ciclo, dando un total de 38 ciclos.

Al finalizar el tiempo de extracción se retiraron los matraces bola y se colocaron en un evaporador rotativo para eliminar el solvente de extracción de los lípidos. Los matraces bola, con los lípidos de pesaron para obtener la cantidad total de lípidos extraídos. Finalmente, la biomasa sin lípidos fue recuperada y se analizó por FTIR.

4.4 Solución madre de PCF

Previo al diseño experimental, se preparó la solución stock de pentaclorofenol (PCF/MeOH). Para ello se requirió sal de pentaclorofenol en grado reactivo, específicamente Pentaclorofenato de sodio con 90% de pureza, de la marca *Aldrich Chemical Company, Inc.* Asimismo se requirió metanol en grado reactivo (CH_3OH , pureza de 99.97%).

Los cálculos se realizaron considerando las purezas, para obtener una solución stock de 100 ppm. Para 250 ml se pesaron 0.0277 g de la sal Pentaclorofenato sódico en una balanza analítica. Posteriormente se trasladó la sal previamente pesada a un matraz volumétrico de 250 ml, en donde se llevó al aforo con metanol.

La solución madre se agitó y se vació en un frasco etiquetado para su almacenamiento.

4.5 Diseño experimental

Antes de realizar el diseño experimental de superficie de respuesta, se realizaron pruebas exploratorias para identificar el intervalo de pH donde la biosorción de PCF se favorece. Los pH elegidos para esta primera parte del experimento fueron 2, 4, 6 y 8, basados en la literatura.

Para el pH 2 se utilizó una solución amortiguadora de fosfatos ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) 0.1 M, para el pH 4 y 6 se utilizó una solución amortiguadora de citratos ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0.1 M, y para el pH 8 se utilizó una solución amortiguada de fosfatos 0.2 M. Los valores de pH fueron ajustados con NaOH y HCl concentrado.

Para las pruebas de sorción preliminares se realizaron un volumen de solución amortiguadora de 20 ml, una concentración de PCF de 10 ppm y 50 mg de sargazo. A cada alícuota se le añadió una cantidad de 200 microlitros de la solución madre de PCF/meOH. Los experimentos se mantuvieron en agitación a 150 rpm y una temperatura de 28°C por 3 días.

Terminado el tiempo de incubación, se tomaron 1.2 mL de la fase acuosa, se centrifugaron a 12,000 rpm durante 10 minutos, en una centrífuga utilizada fue marca Eppendorf modelo 5810 R. Las muestras centrifugadas se filtraron con membranas de nitrocelulosa de 0.45 μm . Finalmente, las muestras se almacenaron a 4°C hasta su análisis por HPLC. Todas las pruebas de sorción preliminares se realizaron por triplicado.

Después, para cuantificar el PCF removido, las muestras fueron analizadas por HPLC.

4.6 Diseño Central Compuesto 2^2 con puntos centrales

Con base en las pruebas preliminares de sorción de PCF en función del pH, se estructuró un Diseño Central Compuesto 2^2 rotatable para encontrar los valores óptimos de pH y dosis de sargazo para maximizar la sorción de PCF.

El Diseño de optimización contó con 4 tratamientos radiales, 4 tratamiento axiales y un tratamiento central (punto central). Todos los tratemos se realizaron por triplicado, con excepción del punto central, el cual se replicó 24 veces.

En la tabla 6 se resumen los tratamientos utilizados.

Los tratamientos de sorción se dejaron en incubación por 3 días a 30°C y 150 rpm. Finalizado el tiempo de incubación, se tomaron muestras de la fase líquida, se centrifugaron y filtraron como se describió anteriormente para cuantificar el PCF no sorbido por HPLC.

Tabla 6. Tratamientos del diseño de compuesto central

Niveles	Sargazo (mg)	pH	PCF inicial (mg/L)
bajo, bajo	25	4	20
alto, bajo	75	4	20
bajo, alto	25	6	20
alto, alto	75	6	20
axial	14.6447	5	20
axial	85.3553	5	20
axial	50	3.5858	20
axial	50	6.4142	20
central	50	5	20

5 Métodos analíticos

5.1 Cuantificación de PCF por HPLC

Las muestras fueron analizadas en un cromatógrafo de líquidos de alta resolución, marca Agilent, modelo 1100 por la técnica de Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC por sus siglas en inglés).

Para el análisis en el equipo de cromatografía, se utilizó una columna de octadecilsilano C 18 de fase reversa para el análisis, siendo la fase móvil acetonitrilo. La temperatura fue $40^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$, los límites de presión de 0.0 a 370 bar. La longitud de onda en la señal "A" fue de 240 nm y en la señal "B" de 303 nm, y se utilizó una lámpara UV. El tiempo de retención fue de 6 minutos, siendo el flujo de 1 ml/min.

Los puntos de la curva de calibración para este análisis fueron 1 ppm, 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, 10 ppm y 12 ppm. La curva de calibración en el equipo de cromatografía tuvo una correlación de 0.99989.

6 Análisis de resultados

6.1 Caracterización del sargazo por FTIR

Las muestras pulverizadas de sargazo fueron analizadas por FTIR. El espectro obtenido se muestra en la figura 11. La identificación de las bandas (picos) en el espectro IR se realizaron con el software ©OriginLab.

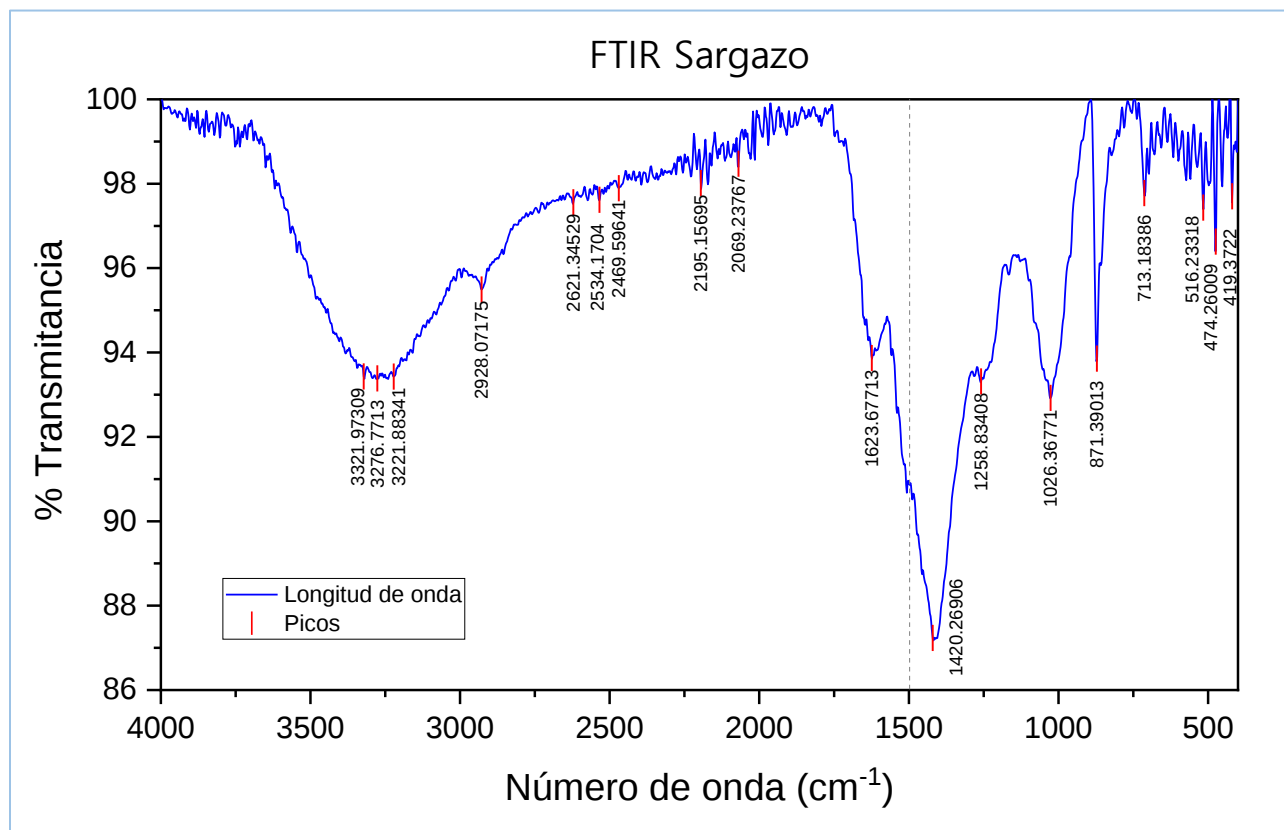


Figura 11. Espectro IR de la muestra de sargazo

En la Tabla 7 se resumen el número de onda de las bandas localizadas en el espectro IR de la biomasa del sargazo, así como el grupo funcionales identificados y las posibles macromoléculas de donde proceden los grupos funcionales.

Tabla 7. Enlaces y compuestos de los picos FTIR

Número de onda (cm ⁻¹)	Enlaces	Grupos funcionales	Estructuras y Compuestos	Macromoléculas
3500 a 3000	O-H N-H ≡C-H st =C-H st	Hidroxilo (OH) Carboxilo (-COOH) Aminas (NH ₂ , NH) Amonio (N ⁺ -H)	Alcoholes (O-H)	Carbohidratos Proteínas Lípidos
2928	-C-H	Aminas (NH ₂)		Proteínas Lípidos
1623	C=O st C=N st C=C st N=O st N-H σ	Carboxilo (-COOH) Aminas (NH ₂) Amoniacó (NH ₃ ⁺) Aldehído (-CHO)	Alicíclicos (C=C) Aromáticos (C-C)	Proteínas Lípidos
1420	B-O st C-N st C-F st S=O st C-O st	Hidroxilo (OH) Carboxilo (-COOH)	Aromáticos (C-C) Alcoholes (O-H)	Carbohidratos Lípidos
1258	B-O st C-N st C-F st S=O st C-O st P=O st C=S st P-O st	Hidroxilo (OH) Éteres (C-O)	Alcoholes (O-H) Aromáticos (C-H)	Carbohidratos Lípidos
1026	C-N st C-F st S=O st C-O st P=O st P-O st N-O st =C-H σ	Hidroxilo (OH) Éteres (C-O)	Compuestos clorados Compuestos de bromo Alcoholes (CH ₂ -OH, CH-OH) Aromáticos (C-H)	Carbohidratos Lípidos
871	P-O st N-O st =C-H σ COOH S-O st	Carboxilo (-COOH) Aminas (NH ₂)	Alenos ((C=C)=CH ₂) Aromáticos (C-H) Heteroaromáticos (C-H)	Proteínas Lípidos

En el espectro de la biomasa de sargazo holopelágico se puede observar una curvatura en la zona de 3500 a 3000 cm⁻¹ de número de onda. De acuerdo con Pretsch et al., 2020, puede indicar la presencia de los siguientes enlaces O-H y N-H. Además, la forma de la banda en este rango es apropiada para los compuestos nitrogenados, como los grupos amino o amonio. De acuerdo con Kosa et al., 2018, el número de onda 3300 cm⁻¹ está asociada a proteínas debido al enlace tensión de N-H.

En la zona de $3000\text{-}2750\text{ cm}^{-1}$, se puede observar un pico, lo que podría indicar la presencia de un enlace -C-H , además de compuestos nitrogenados como NH_2^+ (Pretsch et al., 2020). De acuerdo con Kosa et al., 2018, el número de onda 2925 cm^{-1} está asociado a lípidos, y presenta un enlace de tensión de CH_2 de cadenas de acilo.

Asimismo, de acuerdo con Barraza-Garza et al., 2013, el número de onda 2930 cm^{-1} es un enlace CH_2 asimétrico, asociado a lípidos. Además, Khambhaty et al., 2009, mencionan que el número de onda 2926 cm^{-1} es representativo de un enlace de tensión de -CH , asociado a grupos amina o amida.

En la zona de $1750\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ de número de onda se puede observar un pico con valor de 1623 cm^{-1} , lo que de acuerdo con Pretsch et al., 2020 podría tratarse de diferentes enlaces entre carbono, nitrógeno u oxígeno. En este intervalo se destaca la presencia de grupos amino como NH_2 y NH_3^+ . De acuerdo con Khambhaty et al., 2009, el número de onda 1633 cm^{-1} confirma la presencia de tensión de N-H .

Por otra parte, en la región de $1500\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ se puede observar un pico muy marcado, que podría tratarse de compuestos alicíclicos o aromáticos, de acuerdo con Pretsch et al., 2020. Los compuestos aromáticos son derivados del benceno, y se constituyen de uno o más anillos, mientras que los alicíclicos no son aromáticos.

De acuerdo con Kosa et al., 2018, el número de onda 1265 cm^{-1} está asociado a polifosfatos y fosfolípidos, debido al enlace de tensión de P=O asimétrico. De acuerdo con Bairagi et al., 2011, el número de onda 1400 cm^{-1} y 1452 cm^{-1} se refieren a COO^- de grupos carboxilos.

También, cerca de esa zona, se puede encontrar un pico en aproximadamente 1250 cm^{-1} , lo que puede indicar la presencia de los enlaces anteriormente mencionados (de $1500\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$) además de P=O , C=S , P-O . De acuerdo con Pretsch et al., 2020, este pico hace referencia a compuestos como alcoholes, éteres y aromáticos.

El enlace C-N puede tratarse de aminas ya que hace referencia a compuestos nitrogenados. Además, la presencia de compuestos aromáticos y alcoholes sugiere presencia de fenoles.

Un último pico pronunciado se ubica en el número de onda 871 cm^{-1} . Nuevamente en este intervalo podemos encontrar aminas (NH_2). De acuerdo con Kosa et al., 2018, el número de onda 875 cm^{-1} se relacionan con polifosfatos y fosfolípidos, debido al enlace de tensión de P-O-P .

De acuerdo con Pretsch et al., 2020, los grupos amino se confirman en las bandas de número de onda 2928 cm^{-1} como tensión de NH_2^+ , en la banda 1623 cm^{-1} como NH_2 y NH_3^+ . Se ha reportado también que en el intervalo de $1623\text{-}1420\text{ cm}^{-1}$ se pueden encontrar enlaces C=C y =C-O de fenoles. Los compuestos aromáticos que destaca el pico 1420 cm^{-1} , pueden tratarse de alcoholes, junto con los grupos hidroxilo. Es importante señalar que los grupos hidroxilo se encuentran en carbohidratos y lípidos.

En la figura 12 se ilustran las zonas en el espectro IR del sargazo donde se localizan las principales macromoléculas de la biomasa.

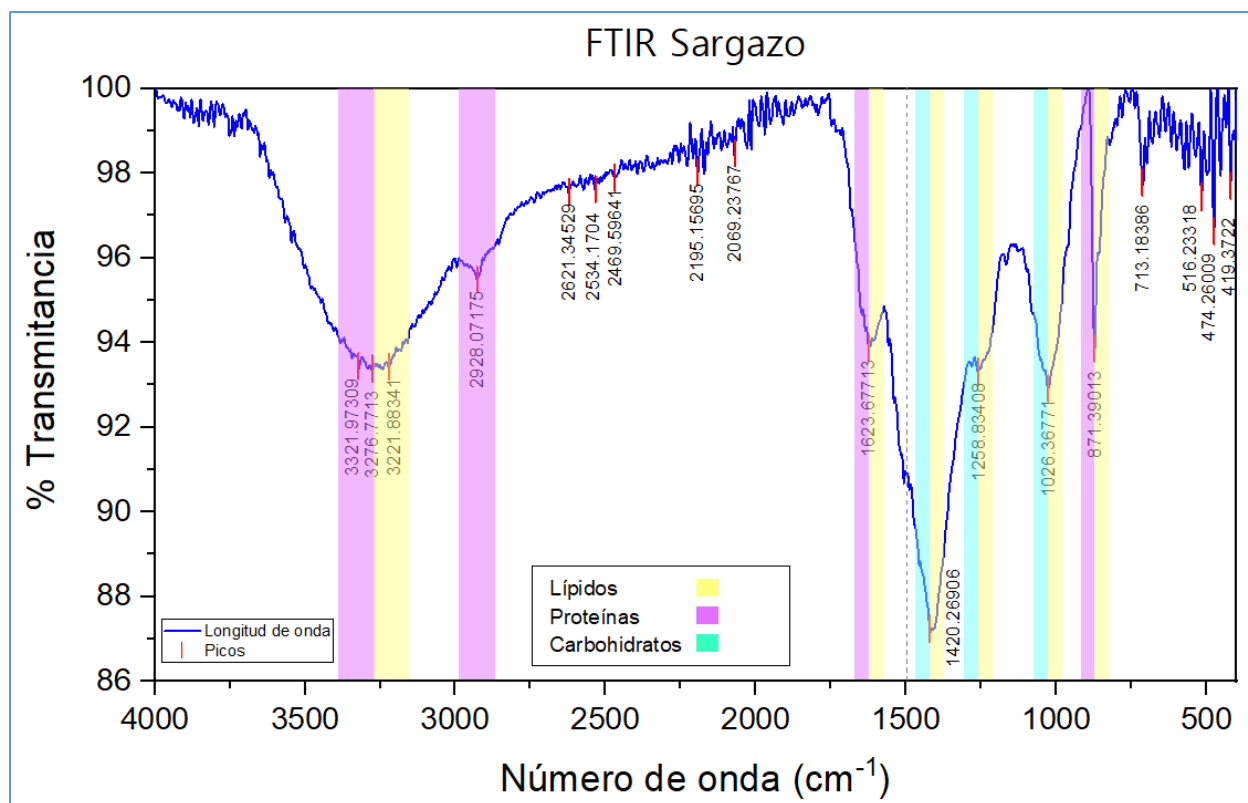


Figura 12. Macromoléculas observadas en el espectro FTIR

6.2 Extracción de lípidos

La extracción de los lípidos de la biomasa del sargazo se realizó con un equipo Soxhlet. El contenido de lípidos se estimó por gravimetría aplicado la ecuación 9.

$$\% \text{ Lípidos} = \frac{M_L - M_O}{\text{Biomasa}} * 100 \quad \text{Ec (9)}$$

Donde:

- M_L es el matraz con los lípidos
- M_O es el matraz sin los lípidos
- Biomasa es la masa de sargazo utilizada para la extracción

El contenido de lípidos en el sargazo fue en promedio de 11.95 ± 0.99 % (Tabla 9).

Tabla 8. Resultados de extracción de lípidos

Sistema	Biomasa inicial [g]	% Lípidos
1	1.0147	11.3%
2	0.9969	12.6%

Estos resultados concuerdan con lo reportado por otros autores como Castro et al., 2022 que obtuvieron alrededor de 7% de grasas para las especies de sargazo holopelágico. En contraste Farghali et al., 2023 y Stiger-Pouvreau et al., 2023 sólo encontraron 1-5 % de lípidos en algas marinas y pardas.

La Figura 13 muestra el espectro FTIR del sargazo holopelágico después de la extracción de lípidos. Los picos detectados son prácticamente los mismos a los detectados en el sargazo holopelágico original. Sin embargo, el cambio más notorio es en el intervalo de número de onda de $3500\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, asociada con proteínas, lípidos y fenoles. Esta reducción en la transmitancia puede indicar pérdida de algunas de las moléculas de la muestra durante la extracción de lípidos, lo que concuerda con los resultados obtenidos en la extracción.

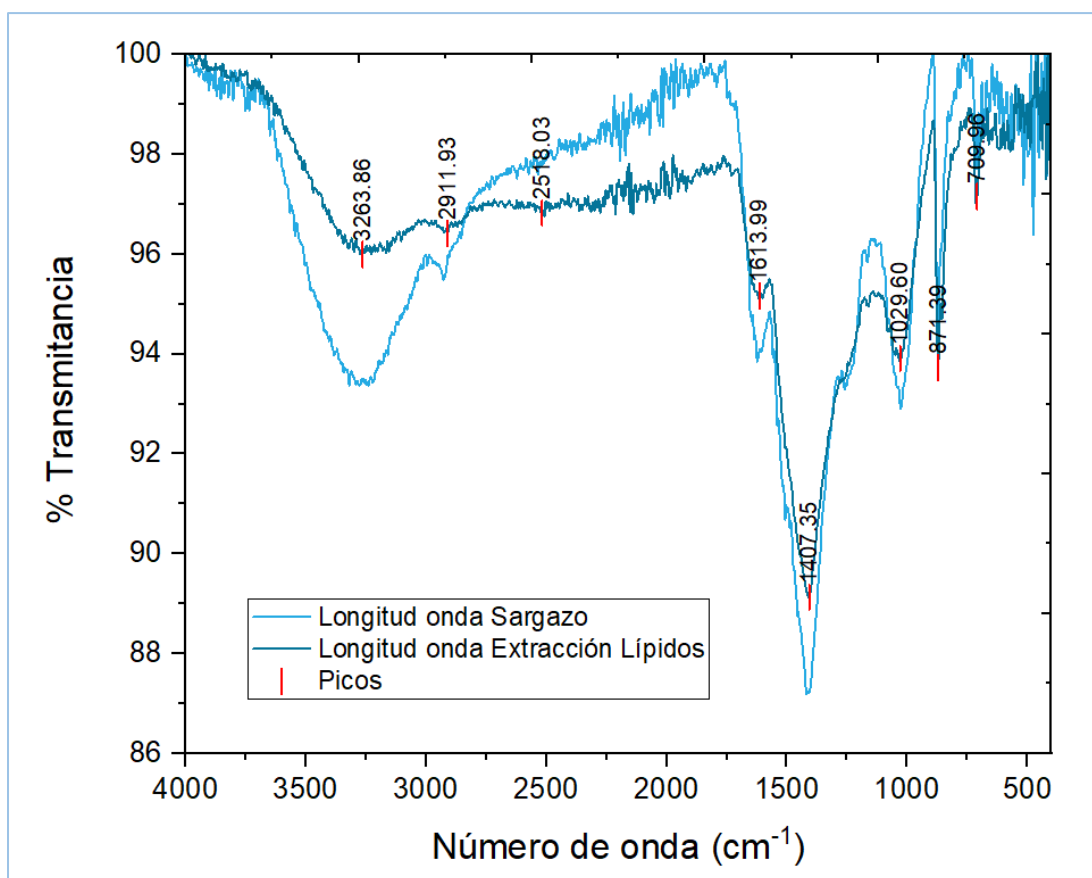


Figura 13. Espectro FTIR extracción de Lípidos

6.3 Diseño Central compuesto 2² con puntos centrales

Del experimento para conocer las condiciones donde la biosorción de pentaclorofenol se favorece, se encontró que los mejores pH son 4 y 6.

La matriz experimental del Diseño Central Compuesto 2² para maximizar la sorción de PCF en sargazo se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Tratamientos y variable de respuesta del DCC

Tratamiento	Sargazo (mg)	pH	q _e (mg/g)			Promedio q _e (mg/g)
A	25	4	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
B	75	4	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
C	25	6	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
D	75	6	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
E	14.6447	5	5.8890	8.0000	8.0000	7.2963
F	85.3553	5	6.5090	8.0000	8.0000	7.5030
G	50	3.58579	6.5937	8.0000	8.0000	7.5312
H	50	6.41421	6.7733	8.0000	8.0000	7.5911
I	50	5	7.1184	8.0000	8.0000	7.7061
J	50	5	0	0	8.0000	8.0000
K	50	5	7.3628	7.3571	8.0000	7.5733
L	50	5	6.4628	8.0000	8.0000	7.4876
M	50	5	6.5480	8.0000	8.0000	7.5160
N	50	5	6.7431	8.0000	8.0000	7.5810
O	50	5	6.5566	8.0000	8.0000	7.5189
P	50	5	7.1580	8.0000	8.0000	7.7193

En la tabla 14 se muestra en Análisis de Varianza (ANOVA) realizado al diseño experimental con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$). Este análisis indicó que la dosis del sargazo fue el único factor lineal que modificó significativamente la sorción de PCF ($P\text{-value} < 0.05$). Sorpresivamente, el factor lineal de pH no mostró un efecto significativo en la sorción del PCF, al igual su efecto cuadrático ($P\text{-value} > 0.05$). Esto indica que el pH de la fase acusa no favorece o limita la sorción de PCF en la biomasa de sargazo.

El efecto de dosis de sargazo cuadrada afectó significativamente la remoción de PCF ($P\text{-value} < 0.05$). El efecto de interacción entre la dosis de sargazo y el pH no contribuyó de forma significativa en la sorción de PCF.

Tabla 10. Análisis de Varianza para q_e

Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico F	Valor P
A:sargazo	738.453	1	738.453	1584.83	0.0000
B:pH	0.0146119	1	0.0146119	0.03	0.8603
AA	152.175	1	152.175	326.59	0.0000
AB	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BB	0.405503	1	0.405503	0.87	0.3562
Error total	19.5699	42	0.465949		
Total (corr.)	910.617	47			

R-cuadrado = 97.8509%

R-cuadrado ajustado = 97.5951%

Error Estándar de Estimación = 0.682605

Error absolute medio = 0.588118

Estadístico de Durbin-Watson = 0.599851 (P=0.0000)

Residual de autocorrelación 1 = 0.689909

Con base en los resultados obtenidos del análisis de regresión, el modelo de segundo orden propuesto, considerando todos los factores del modelo, para explicar la relación empírica entre la capacidad de sorción de PCF, la dosis de sargazo y el pH fue la ecuación 10.

$$q_e = 25.3942 - 0.624769 \cdot \text{sargazo} + 1.32452 \cdot \text{pH} + 0.0040289 \cdot \text{sargazo}^2 + 0.0 \cdot \text{sargazo} \cdot \text{pH} - 0.129985 \cdot \text{pH}^2$$

Ec. (10)

El análisis de análisis de regresión múltiple del diseño experimental mostró un ajuste bueno del modelo cuadrático a los datos experimentales de capacidad de sorción. Los valores del coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) indican una alta dependencia y correlación entre los datos experimentales de sorción y los predichos por el modelo (tabla 14). El R^2 fue de 97.85%, mientras el R^2_{adj} fue de 97.59%, lo cual indica que el modelo cuadrático propuesto explica el 97.59% de la variabilidad observada del valor de la capacidad sorción de PCF.

El signo negativo del coeficiente lineal de sargazo confirma su efecto antagónico (negativo) en las sorción de PCF; a medida que la dosis de sargazo aumenta, la capacidad de sorción de PCF disminuye casi linealmente (figura 14).

El valor de la constante de intercepción del modelo (25.39) indica el valor promedio de la capacidad de sorción de PCF, el cual es independiente de la dosis de sargazo y el pH.

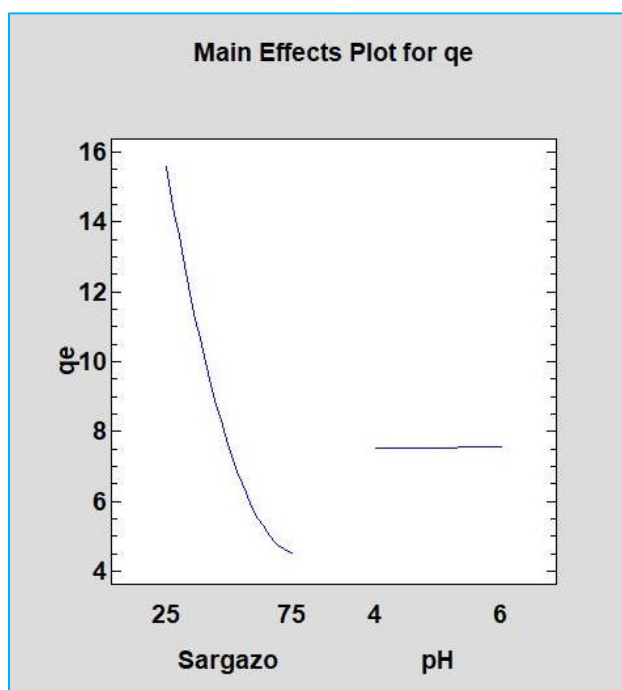


Figura 14. Efectos principales del modelo

Dado que el modelo de la ecuación 10 contiene términos que no contribuyen de forma significativa a predecir la capacidad de sorción de PCF, el modelo cuadrático fue depurado para eliminar los términos no significativo.

El ANOVA de este segundo análisis se muestra en la tabla 11. En la figura 15 se muestra el diagrama de Pareto, el cual nos indica si los efectos de los factores del diseño, que afectan significativamente la capacidad de sorción de PCF, son positivos o negativos.

En este caso el factor dosis de sargazo, mostró un efecto negativo muy marcado, esto quiere decir que entre mayor es la dosis del biosorbente, menor es la capacidad de sorción del PCF. En cambio, el efecto cuadrático del sargazo es positivo, lo que quiere decir que existe un efecto positivo del sargazo en la curvatura de la superficie de respuesta.

Tabla 11. ANOVA para q_e excluyendo efectos

Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico F	Valor P
A:Sargazo	738.453	1	738.453	1626.60	0.0000
B:pH	0.0146119	1	0.0146119	0.03	0.8584
AA	152.175	1	152.175	335.20	0.0000
Error total	19.9754	44	0.453986		
Total (corr.)	910.617	47			

R-cuadrado = 97.8064 %

R-cuadrado ajustado = 97.6568 %

Error Estándar de Estimación = 0.673785

Error absoluto medio = 0.596242

Estadístico de Durbin-Watson = 0.57121 (P=0.0000)

Residual de autocorrelación 1 = 0.704516

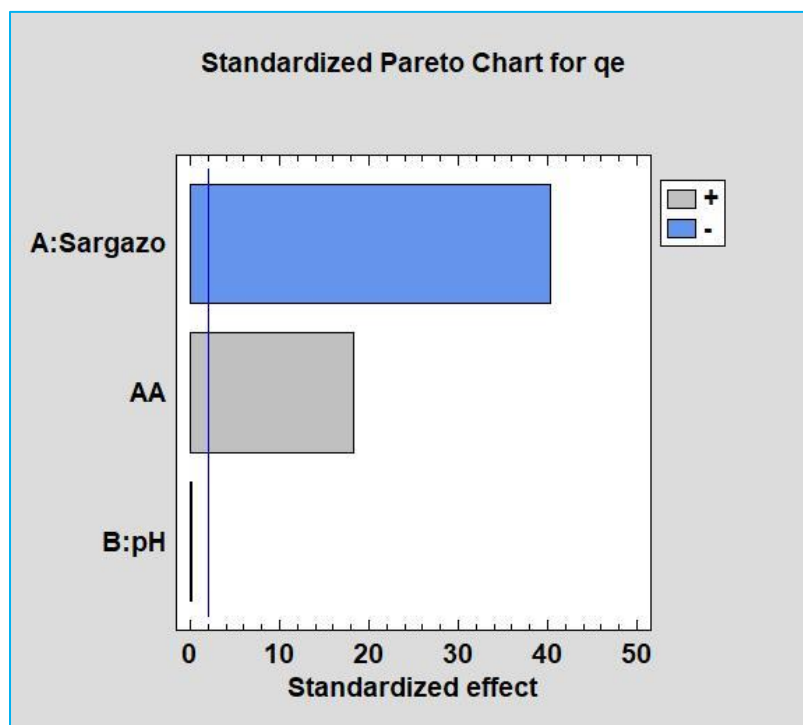


Figura 15. Diagrama de Pareto

Al eliminar los términos no significativos del modelo de regresión cuadrático (pH cuadrático, pH-sargazo) el ajuste de los datos experimentales con los predichos por el nuevo modelo (ecuación 11) siguieron mostrando una alta dependencia y correlación ($R^2 = 97.81\%$ y $R^2_{adj} = 97.66\%$).

$$q_e = 28.5789 - 0.624769 * \text{Sargazo} + 0.0246745 * \text{pH} + 0.0040289 * \text{Sargazo}^2 \quad \text{Ec. (11)}$$

El efecto combinado del pH y la dosis de sargazo sobre la capacidad de sorción de PCF se muestra en la superficie de respuesta en la figura 16.

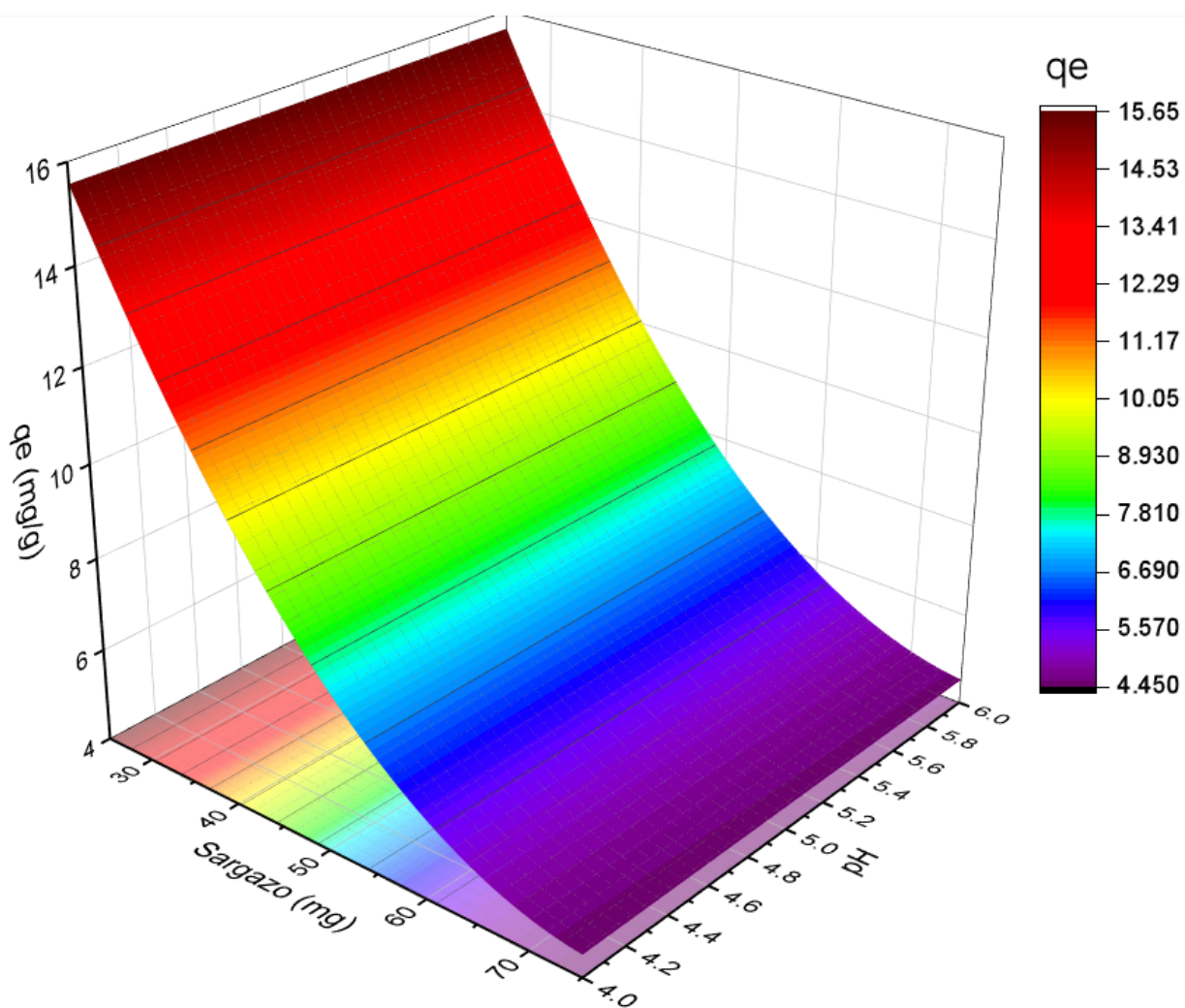


Figura 16. Superficie de respuesta de q_e

Como se puede observar en la figura 16, esta superficie de respuesta no presenta una forma de campana, por lo tanto, no tiene un óptimo local donde se maximice la capacidad de sorción de PCF. Sin embargo, se pueden dibujar 3 conclusiones de los resultados obtenidos:

1) el pH de la fase acuosa no tiene un efecto sobre la capacidad de sorción de PCF en sargazo, lo cual indica que este biosorbente puede utilizarse en un amplio intervalo de pH sin perder su capacidad de sorción; 2) dosis pequeñas de sargazo (de 30 a 40 mg) favorecen el aumento en la capacidad de biosorción de PCF; 3) dosis altas de sargazo (> 40 mg) ocasionan una disminución, con una tendencia cuadrática, de la capacidad de sorción de PCF en sargazo.

Finalmente, los resultados de las lecturas en cromatografía y la construcción de una superficie de respuesta, mostraron que las condiciones óptimas de pH y cantidad de sargazo son las siguientes:

Tabla 12. Condiciones óptimas de pH y biomasa

pH	Sargazo (mg)
6.4143	14.6447

7 Conclusiones

- ❖ La biomasa de *Sargassum sp.* sin ningún tratamiento químico es un potencial biomaterial para la sorción de PCF, ya que este residuo sólido contiene un gran número de grupos funcionales (macromoléculas), incluyendo lípidos, donde el PCF puede tener interacción química.
- ❖ De acuerdo a los análisis estadísticos realizados, el pH de la fase acuosa no es un factor que afecte de forma significativa la capacidad de sorción de PCF en el sargazo, lo cual es una característica favorable desde el punto de vista operativa, ya que este biomaterial podría utilizarse para la remoción de PCF en un amplio espectro de valores de pH sin perder su capacidad de sorción.
- ❖ La dosis de sargazo es un factor que afecta considerablemente la capacidad de sorción de PCF. Sin embargo, dosis inferiores a 40 mg son recomendables para mejorar la capacidad de sorción del biomaterial, es decir, en un rango de 30 a 40 mg.
- ❖ La interacción ente el pH y la dosis de sargazo, en la zona experimental evaluada, no muestran una combinación óptima para maximizar la capacidad de sorción del PCF.

8 Referencias bibliográficas

- Anand, U., Dey, S., Parial, D., Federici, S., Ducoli, S., Bolan, N. S., Dey, A., & Bontempi, E. (2023). Algae and bacteria consortia for wastewater decontamination and transformation into biodiesel, bioethanol, biohydrogen, biofertilizers and animal feed: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1585–1609. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01562-w>
- Antonio-Martínez, F., Henaut, Y., Vega-Zepeda, A., Cerón-Flores, A. I., Raigoza-Figueras, R., Cetz-Navarro, N. P., & Espinoza-Avalos, J. (2020). Leachate effects of pelagic *Sargassum* spp. on larval swimming behavior of the coral *Acropora palmata*. *Scientific Reports*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60864-z>
- Bairagi, H., Khan, M. M. R., Ray, L., & Guha, A. K. (2011). Adsorption profile of lead on *Aspergillus versicolor*: A mechanistic probing. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 756–764. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.064>
- Barraza-Garza, G., De La Rosa, L. A., Martínez-Martínez, A., Castillo-Michel, H., Cotte, M., & Alvarez-Parrilla, E. (2013). La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos. *Revista Latinoamericana de Química*, 41(3), 125–148.
- Baweja, P., Kumar, S., Sahoo, D., & Levine, I. (2016). Biology of Seaweeds. *Seaweed in Health and Disease Prevention*, 41–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00003-8>
- Biscaldi, G. P., Fonte, R., & Candura, S. (1986). Toxicology of pesticides. *Medecine Biologie Environnement*, 14(1), 231–238. <https://doi.org/10.1136/oem.34.2.152>
- Bustos, C. (2012). *Pentaclorofenol*. 1. <https://espanol.epa.gov/sites/production-es/files/2015-09/documents/spch7.pdf>
- Cancino, K. (2018). *Plaguicidas enferman a habitantes*. <https://bidi.uam.mx:9489/mexico/el-sol-de-zamora/20180623/281865824199654>
- Carral Murrieta, C. O., Serviere Zaragoza, E., Mazariegos Villarreal, A., & Mendoza-Becerril, M. (2023). *Los hidroides: pequeños grandes viajeros*. <https://www.ecosur.mx/los-hidroides-pequenos-grandes-viajeros/>
- Carrillo-Domínguez, S., Rodríguez-Martínez, R. E., Díaz-Martínez, M., Magaña-Gallegos, E., & Cuchillo-Hilario, M. (2023). Potential application of pelagic *Sargassum* spp. in animal feeding. *Journal of Applied Phycology*, 35(1), 433–444. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02877-x>
- Castro, Y. A., Rodríguez, A., & Rivera, E. (2022). Biomethane production kinetics during the anaerobic co-digestion of *Sargassum* spp. and food waste using batch and fed-batch systems in Punta Cana, Dominican Republic. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 11(3), 287–297. <https://doi.org/10.1007/s40243-022-00224-1>
- Changeux, T., Berline, L., Podlejski, W., Guillot, T., Stiger-pouvreau, V., Connan, S., & Thibaut, T. (2023). Variability in growth and tissue composition (CNP , natural isotopes) of the three morphotypes of holopelagic *Sargassum*. *Aquatic Botany*, 187(February), 103644. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2023.103644>

- Chávez-Guerrero, L., Toxqui-Terán, A., Rivera-Haro, J. A., Lozoya-Márquez, L. A., & Lara-Banda, M. (2021). Management of Pelagic *Sargassum* spp. Landings to Atlantic Coastlines Through Direct Combustion and Further Synthesis of Highly Pure Calcium Carbonate Using the Residual Ashes. *Waste and Biomass Valorization*, 12(12), 6591–6599. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01469-z>
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (2020). *Arribazón de sargazo a las costas mexicanas*. <https://www.conacyt.gob.mx/sargazo/index.php/materiales-de-consulta/18-materiales/99-arribo-de-sargazo-a-las-costas-mexicanas-2>
- Dassié, E. P., Gourves, P. Y., Cipolloni, O., Pascal, P. Y., & Baudrimont, M. (2022). First assessment of Atlantic open ocean *Sargassum* spp. metal and metalloid concentrations. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 17606–17616. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17047-8>
- Devault, D. A., Pierre, R., Marfaing, H., Dolique, F., & Lopez, P. J. (2021). *Sargassum* contamination and consequences for downstream uses: a review. *Journal of Applied Phycology*, 33(1), 567–602. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02250-w>
- Devore, J. L. (2001). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (5th ed.). Thomson Learning.
- Dreckmann, K. (2013). *Biología de las Algas*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Enciso, A. (2017, March 13). *Tres plaguicidas peligrosos aún cuentan con registros en el país, reporta Inecc*. <https://www.jornada.com.mx/2017/03/13/sociedad/035n1soc>
- Environment Protection Agency. (2010). *Pentachlorophenol*; CASRN 87-86-5. 1–26.
- FAO, & PNUMA. (2013). Convenio de Rotterdam. *Secretaría Del Convenio de Rotterdam*, 1–60. https://observatoriop10.cepal.org/sites/default/files/documents/treaties/rotterdam_sp.pdf
- Farghali, M., Mohamed, I. M. A., Osman, A. I., & Rooney, D. W. (2023). Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 21, Issue 1). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01520-y>
- Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, 160, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>
- Gobierno de México. (2019). *Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca*. <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>
- Gobierno de México. (2020). *¿Qué son los contaminantes orgánicos persistentes?* <https://www.gob.mx/sre/articulos/que-son-los-contaminantes-organicos-persistentes>
- Golderberg, E., & Min, M. K. (2007). Environmental Concerns. In *Deep Frying: Chemistry, Nutrition, and Practical Applications: Second Edition* (pp. 387–395). <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-92-9.50028-1>
- Hardouin, K., Bedoux, G., Burlot, A.-S., & Nyvall-Collén, P. (2014). Enzymatic Recovery of Metabolites from Seaweeds: Potential Applications. *Advances in Botanical Research*, 71, 279–320. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408062-1.00010-X>
- Hardouin, K., Bedoux, G., Burlot, A.-S., Nyvall-Collén, P., & Bourgoignon, N. (2014). Chapter

- Ten - Enzymatic Recovery of Metabolites from Seaweeds: Potential Applications. In N. B. T.-A. in B. R. Bourgoignon (Ed.), *Sea Plants* (Vol. 71, pp. 279–320). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408062-1.00010-X>
- Hesketh, H. E. (1979). Air pollution control. *Air Pollution Control*.
- Khambhaty, Y., Mody, K., Basha, S., & Jha, B. (2009). Biosorption of Cr(VI) onto marine *Aspergillus niger*: Experimental studies and pseudo-second order kinetics. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(8), 1413–1421. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0028-0>
- Khan, A., Ali, N., Malik, S., Muhammad, B., Hira, M., Luiz Fernando Romanholo, F., & Iqbal, H. M. N. (2021). Chitosan-based green sorbents for toxic cations removal. *Sorbents Materials for Controlling Environmental Pollution: Current State and Trends*, 1894(Crini 2019), 323–352. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820042-1.00014-6>
- Kosa, G., Zimmermann, B., Kohler, A., Ekeberg, D., Afseth, N. K., Mounier, J., & Shapaval, V. (2018). High-throughput screening of Mucoromycota fungi for production of low- and high-value lipids. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1070-7>
- Krop, H., De Voogt, P., Eschauzier, C., & Droge, S. (2020). Sorption of surfactants onto sediment at environmentally relevant concentrations: Independent-mode as unifying concept. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 22(5), 1266–1286. <https://doi.org/10.1039/c9em00580c>
- León-Pérez, M. C., Reisinger, A. S., & Gibeaut, J. C. (2023). Spatial-temporal dynamics of decaying stages of pelagic *Sargassum* spp. along shorelines in Puerto Rico using Google Earth Engine. *Marine Pollution Bulletin*, 188(September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114715>
- León-Santiesteban, H. H., Wrobel, K., García, L. A., Revah, S., & Tomasini, A. (2014). Pentachlorophenol sorption by *Rhizopus oryzae* ENHE: pH and temperature effects. *Water, Air, and Soil Pollution*, 225(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1947-4>
- Louime, C., Fortune, J., & Gervais, G. (2017). *Sargassum* Invasion of Coastal Environments: A Growing Concern. *American Journal of Environmental Sciences*, 13(1), 58–64. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2017.58.64>
- Milledge, J. J., Thompson, E. P., Sauvêtre, A., Schroeder, P., & Harvey, P. J. (2019). Novel developments in biological technologies for wastewater processing. In *Sustainable Water and Wastewater Processing*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816170-8.00008-9>
- Moghal, A. A. B., Reddy, K. R., Mohammed, S. A. S., Al-Shamrani, M. A., & Zahid, W. M. (2017). Sorptive response of chromium (Cr+6) and mercury (Hg+2) from aqueous solutions using chemically modified soils. *Journal of Testing and Evaluation*, 45(1), 105–119. <https://doi.org/10.1520/JTE20160066>
- Muñoz, A. A. (2019). EL SARGAZO EN EL CARIBE MEXICANO: DE LA NEGACIÓN Y EL VOLUNTARISMO A LA REALIDAD. *Sustentabilidad, Gaceta Digital Del Centro Interdisciplinario de Biodiversidad y Ambiente*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- National Toxicology Programs. (2016). Pentachlorophenol and By-products of Its Synthesis. *Report on Carcinogens*, 1–7.

- Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M., Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J., & Tapia-Tussell, R. (2022). Environmental impact of Sargassum spp. landings: an evaluation of leachate released from natural decomposition at Mexican Caribbean coast. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(60), 91071–91080. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22123-8>
- Paraguay-Delgado, F., Carreño-Gallardo, C., Estrada-Guel, I., Zabala-Arceo, A., Martínez-Rodríguez, H. A., & Lardizábal-Gutiérrez, D. (2020). Pelagic Sargassum spp. capture CO₂ and produce calcite. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(20), 25794–25800. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08969-w>
- Pérez, O. R. (2019). *La crisis del sargazo en México*. <https://www.nytimes.com/es/2019/08/16/espanol/americ-latina/sargazo-playas-mexico.html>
- Pohanish, R. P. (2017). *Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens* (7th ed.). <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011E5RX4/sittigs-handbook-toxic/pentachlorophenol>
- Pretsch, E., Bühlmann, P., & Badertscher, M. (2020). Structure Determination of Organic Compounds. In *Structure Determination of Organic Compounds*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62439-5>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Torres-Conde, E. G., & Jordán-Dahlgren, E. (2023). Pelagic Sargassum cleanup cost in Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 237(February). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106542>
- Romanò, R., Basso, R. A., Gineste, A., Andersson, J., Gustavsson, J., Hyttinen, M., Tronville, P., & Rossi, C. (2020). *Air Filtration in HVAC Systems* (R. Romanò (Ed.); 4th ed.).
- Roy, W. R., Bergin, M., & Russell, A. (2019). Environmental Impact Of Solvents. *Handbook of Solvents, Volume 2: Use, Health, and Environment*, 1203–1253. <https://doi.org/10.1016/B978-1-927885-41-3.50006-1>
- Salvador, S., & Salvador, E. (2009). *Contaminantes Orgánicos Persistentes*. 22–26.
- Seepersaud, M. A., Ramkissoon, A., Seecharan, S., Powder-George, Y. L., & Mohammed, F. K. (2018). Environmental monitoring of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Sargassum filipendula and Sargassum vulgare along the eastern coastal waters of Trinidad and Tobago, West Indies. *Journal of Applied Phycology*, 30(3), 2143–2154. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1372-3>
- Stiger-Pouvreau, V., Mattio, L., De Ramon N'Yeurt, A., Uwai, S., Dominguez, H., Flórez-Fernández, N., Connan, S., & Critchley, A. T. (2023). A concise review of the highly diverse genus Sargassum C. Agardh with wide industrial potential. In *Journal of Applied Phycology* (Issue 0123456789). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02959-4>
- Stout, S. A., Litman, E., Baker, G., & Franks, J. S. (2018). Novel Biological Exposures Following the Deepwater Horizon Oil Spill Revealed by Chemical Fingerprinting. *Oil Spill Environmental Forensics Case Studies*, 757–784. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804434-6.00033-1>
- Tabaraki, R., Nateghi, A., & Ahmady-Asbchin, S. (2014). Biosorption of lead (II) ions on Sargassum ilicifolium: Application of response surface methodology. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 93, 145–152.

<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.022>

Thadhani, V. M., Lobeer, A., Zhang, W., Irfath, M., Su, P., Edirisinghe, N., & Amaratunga, G. (2019). Comparative analysis of sugar and mineral content of *Sargassum* spp. collected from different coasts of Sri Lanka. *Journal of Applied Phycology*, 31(4), 2643–2651. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01770-4>

Theirlynck, T., Mendonça, I. R. W., Engelen, A. H., Bolhuis, H., Collado-Vides, L., van Tussenbroek, B. I., García-Sánchez, M., Zettler, E., Muyzer, G., & Amaral-Zettler, L. (2023). Diversity of the holopelagic *Sargassum* microbiome from the Great Atlantic *Sargassum* Belt to coastal stranding locations. *Harmful Algae*, 122(July 2022). <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102369>

Toxic Substances Portal. (n.d.). <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=70>

UNAM. (2019). ¿Qué sabemos del sargazo? <http://ciencia.unam.mx/leer/917/-que-sabemos-del-sargazo->

United Nations. (2020). All POPs listed in the Stockholm Convention. <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/ListingofPOPs/tabid/2509/Default.aspx>

US EPA. (2011). Toxicological Review of Pentachlorophenol. *Review Literature And Arts Of The Americas*, 39(110), 759–786. <https://doi.org/http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0070tr.pdf>

van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. G., Vega-Zepeda, A., & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>

Vinet, L., & Zhedanov, A. (2010). Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, 53, 1–30. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

Visvanathan, C., Thu, L. N., Jegatheesan, V., & Anotai, J. (2005). Biodegradation of pentachlorophenol in a membrane bioreactor. *Desalination*, 183(1–3), 455–464. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.046>

Volesky, B., Weber, J., & Vieira, R. (2000). Biosorption of Cd and Cu by different types of *Sargassum* biomass. In *Process Metallurgy* (Vol. 9, Issue C, pp. 473–482). [https://doi.org/10.1016/S1572-4409\(99\)80136-9](https://doi.org/10.1016/S1572-4409(99)80136-9)

Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science*, 364(6448), 83–87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>

Williams, A. M., & Feagin, R. A. (2010). FINAL REPORT: *Sargassum* and Beach Erosion: Potential Costs and Benefits for Coastal Managers. *Ssl.Tamu.Edu*, 47. http://ssl.tamu.edu/media/1827/06_019_final_report.pdf

Worch, E. (2015). Sorption. In *Hydrochemistry - Basic Concepts and Exercises*. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010ZMS4M/hydrochemistry-basic/sorption-introduction>

Worch, E. (2021). 2 Adsorbents and adsorbent characterization. *Adsorption Technology in Water*

Treatment, 14–48. <https://doi.org/10.1515/9783110715507-002>

World Health Organization. (2010). The WHO Recommended Classification of Pesticides by Hazard. *World Health Organization*.

World Health Organization. (2019). *Persistent organic pollutants (POPs)*. https://www.who.int/foodsafety/areas_work/chemical-risks/pops/en/

9 Anexos

9.1 Reporte fotográfico

En esta sección se muestran fotografías tomadas durante la parte experimental del presente proyecto terminal.



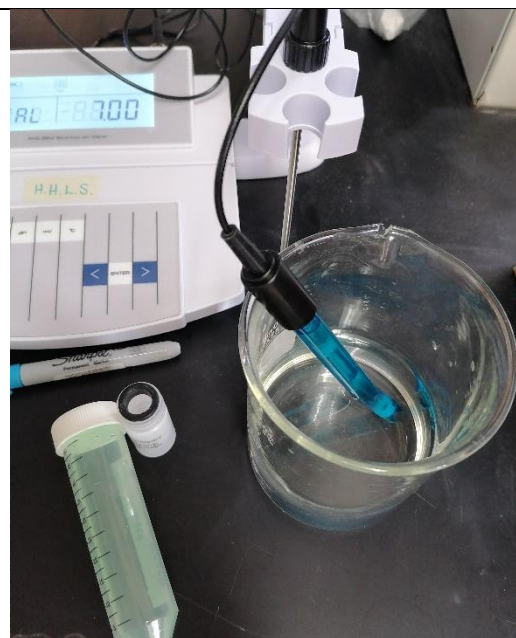
Fotografía 1. Preparación de la muestra de sargazo holopelágico.



Fotografía 2. Sargazo holopelágico después de la esterilización.



Fotografía 4. Tamizado de sargazo.



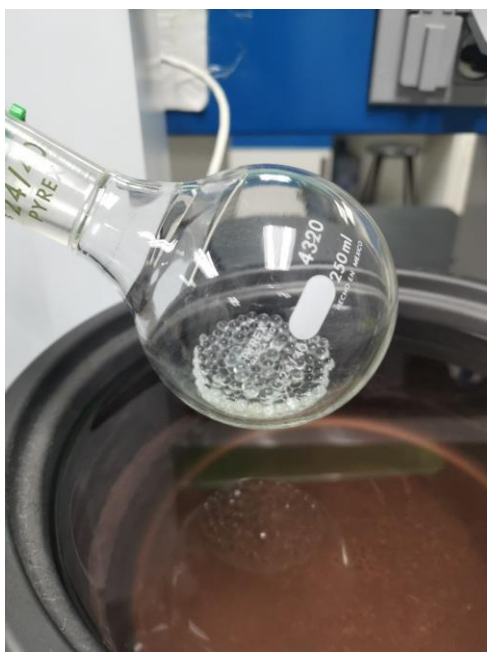
Fotografía 5. Preparación de soluciones buffer.



Fotografía 6. Sistema Soxhlet con solvente n-hexano.



Fotografía 7. Rotaevaporador.



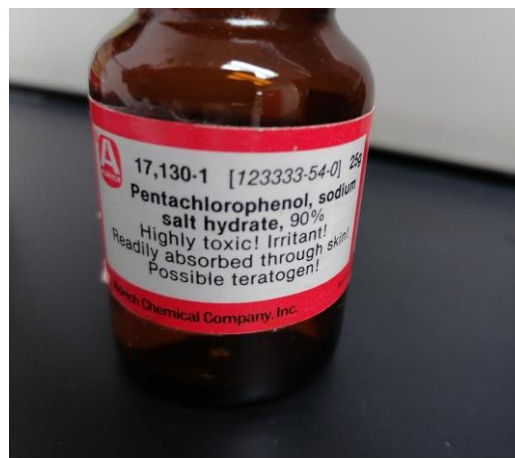
Fotografía 8. Lípidos extraídos.



Fotografía 9. Sistema Soxhlet.



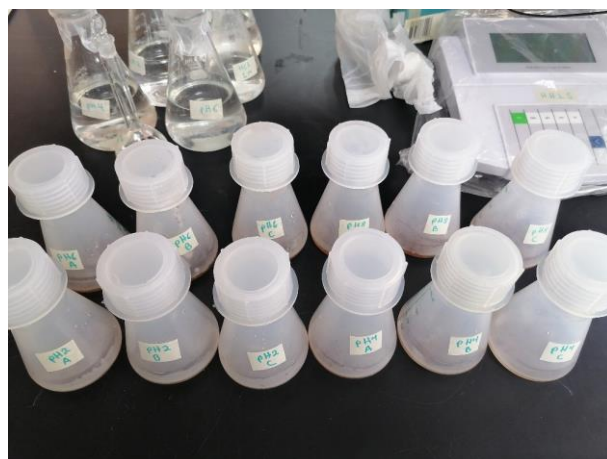
Fotografía 10. Preparación de triplicados.



Fotografía 11. Pentaclorofenol grado reactivo.



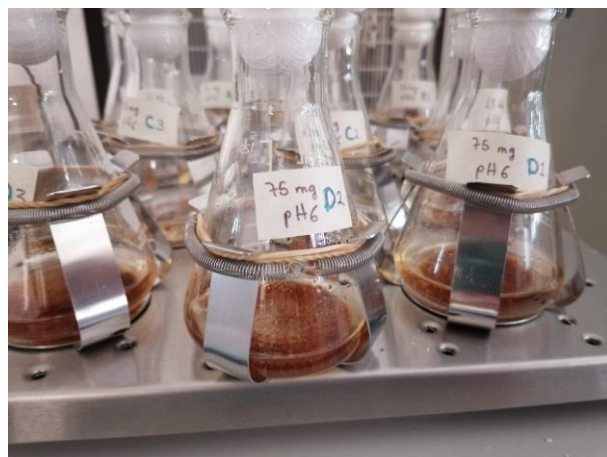
Fotografía 12. Incubación de primeras muestras.



Fotografía 13. Preparación de triplicados para experimento de pH.



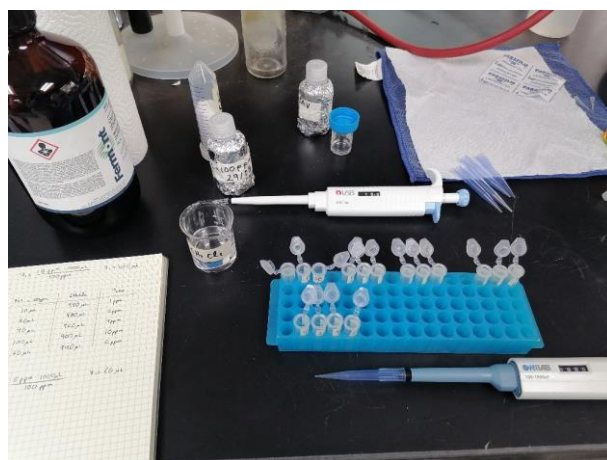
Fotografía 18. Muestras para experimentos de diseño experimental.



Fotografía 19. Tratamientos de pH y biomasa.



Fotografía 20. Incubación de muestras.



Fotografía 21. Extracciones con diclorometano para prueba con lectura en equipo de espectro UV.



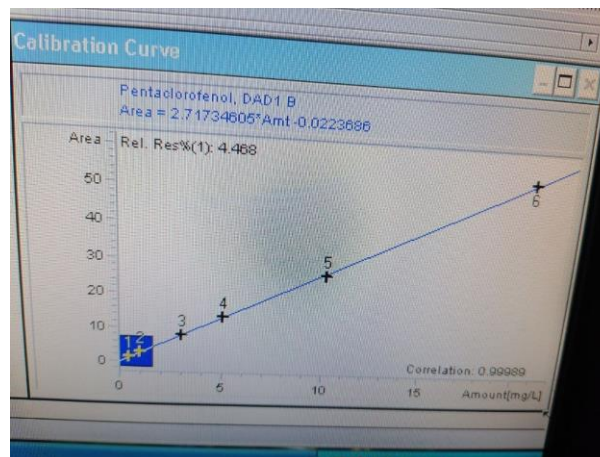
Fotografía 22. Condiciones de la centrífuga.



Fotografía 23. Muestras centrifugadas.



Fotografía 24. Cromatógrafo de líquidos de alta resolución.



Fotografía 25. Curva de calibración del equipo HPLC.



Fotografía 26. Muestras de isoterma después de incubación.



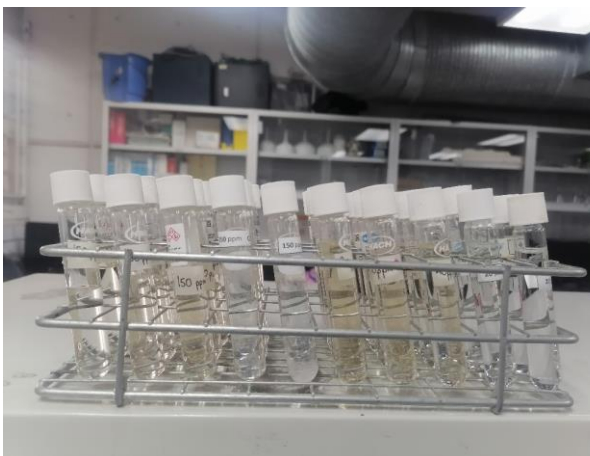
Fotografía 27. Muestras de isoterma con biomasa, después de la incubación.



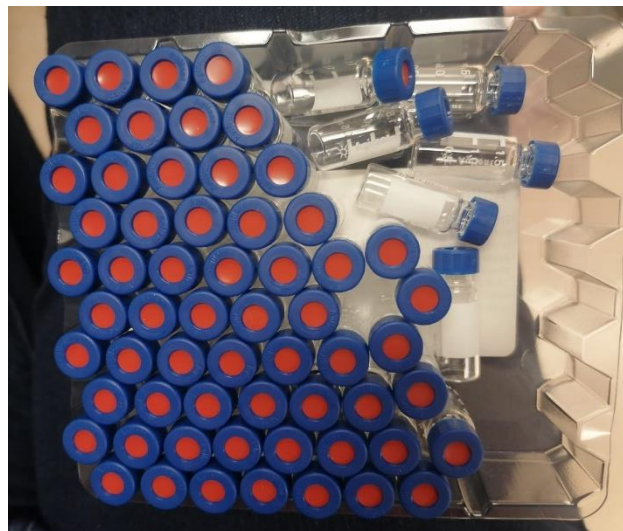
Fotografía 28. Precipitado blanco en la muestra de mayor concentración, en las muestras de isoterma.



Fotografía 29. Biomasa observada en la mayoría de las muestras para isoterma.



Fotografía 30. Muestras de isoterma filtradas.

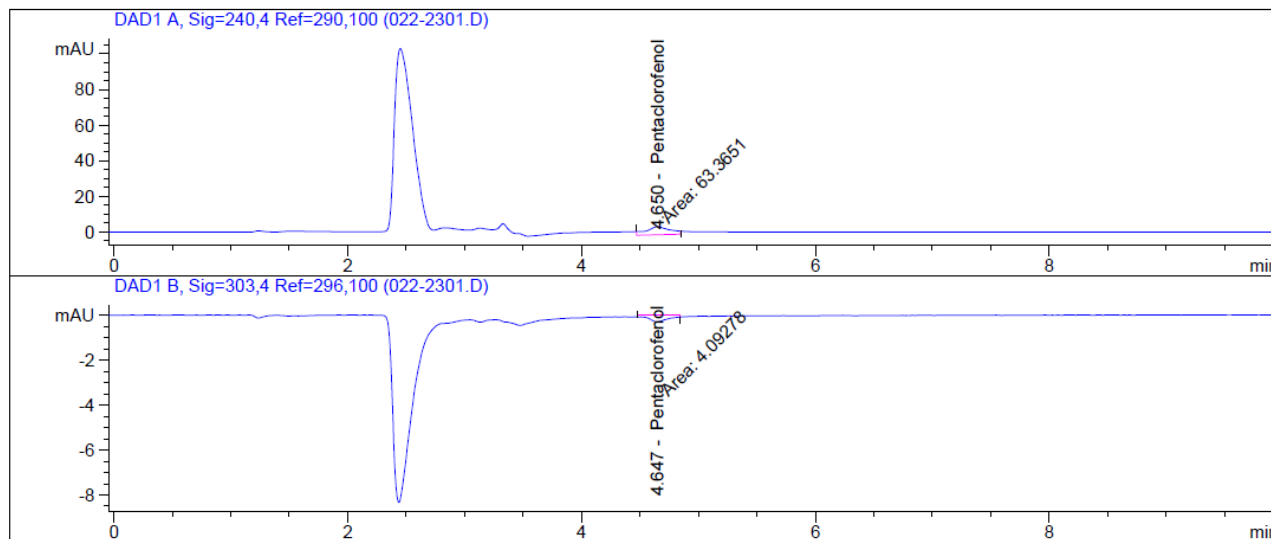


Fotografía 31. Viales para cromatografía.

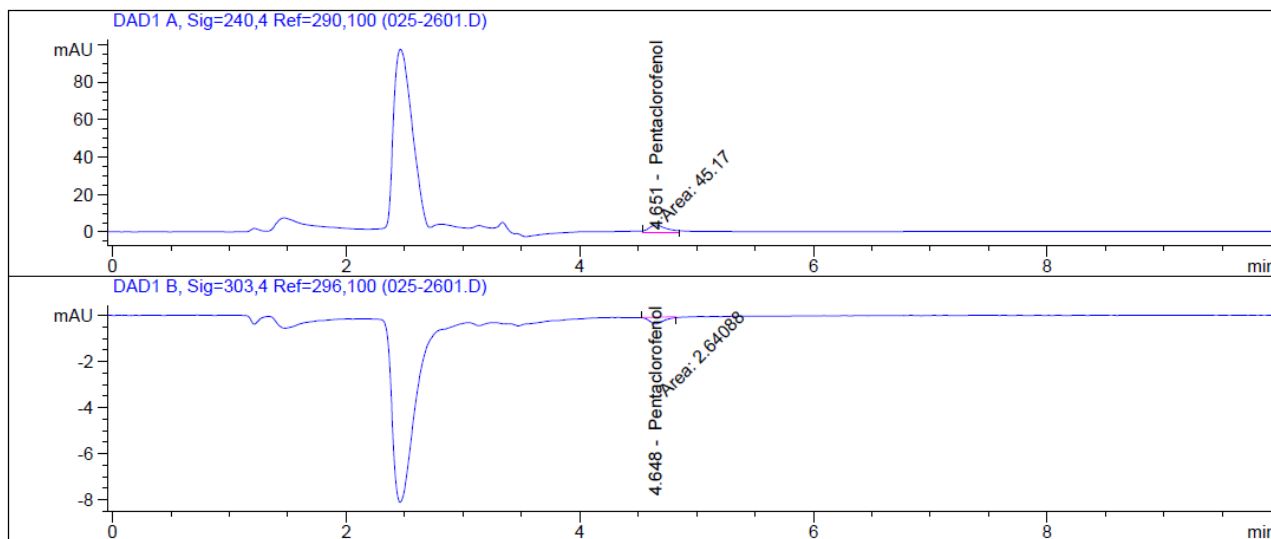
9.2 Lecturas con HPLC

En este apartado se muestran los resultados de las lecturas para la cuantificación de pentaclorofenol por medio de Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia.

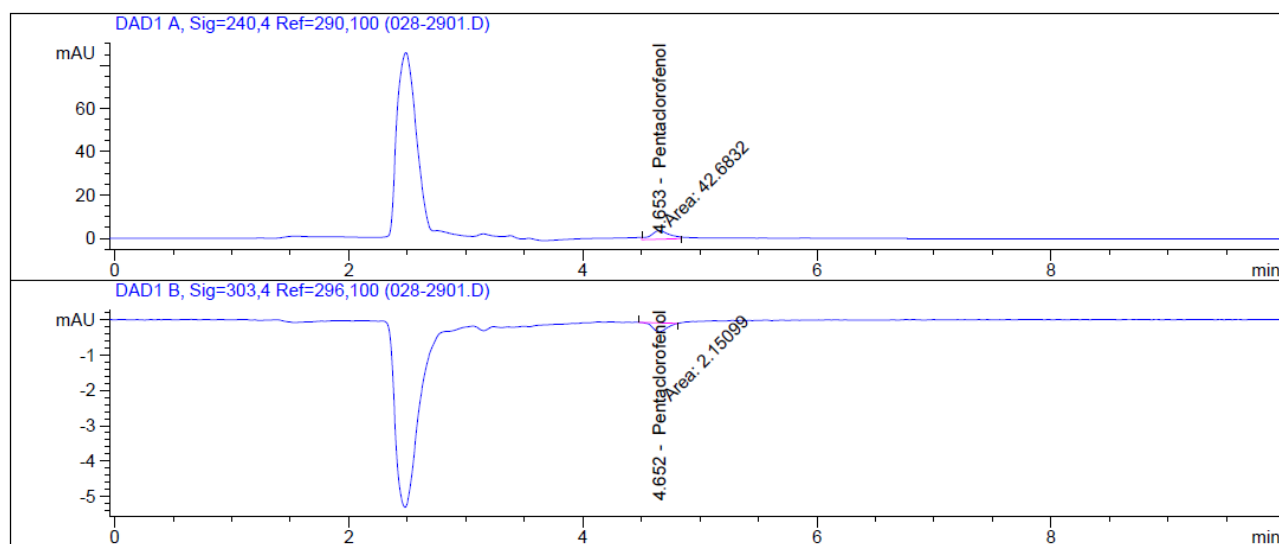
Control E1, con la señal A y B de arreglo de diodos (DAD):



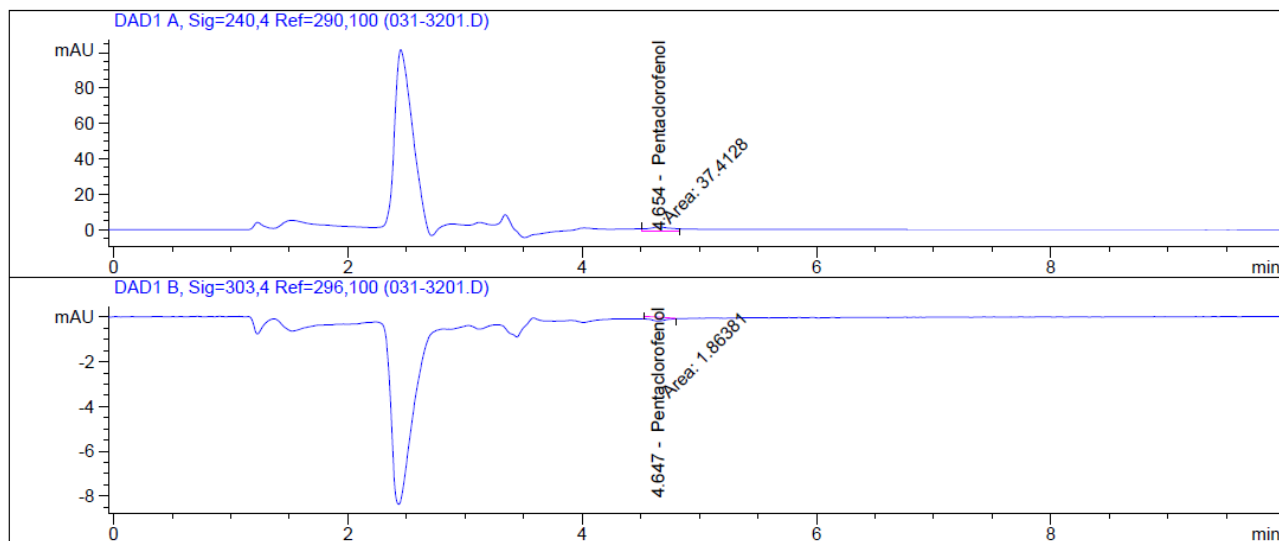
Control F1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



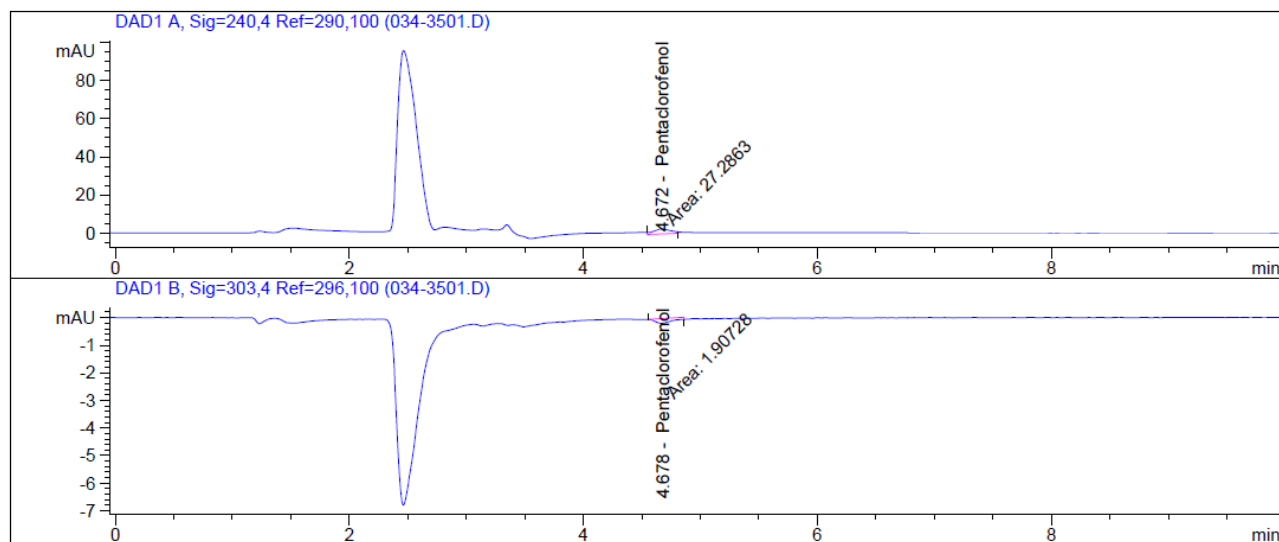
Control G1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



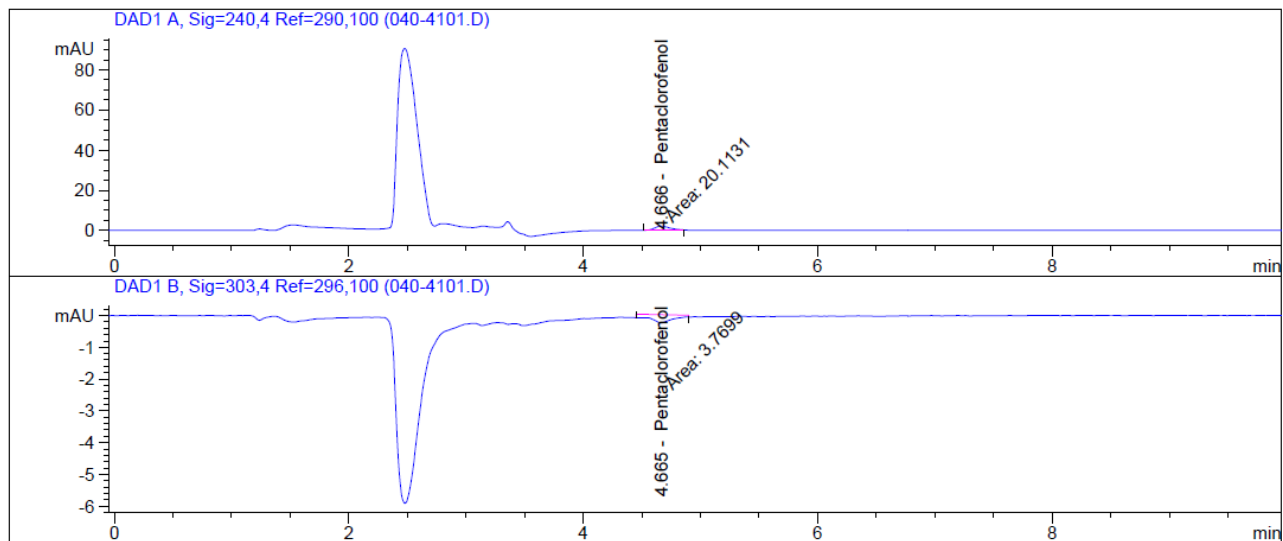
Control H1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



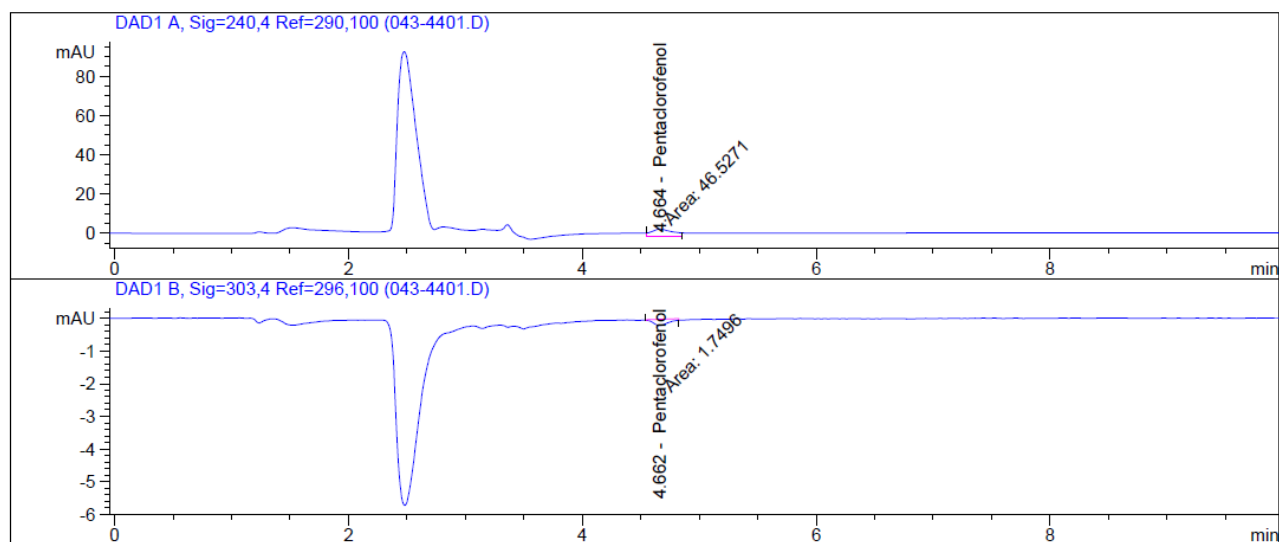
Control I1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



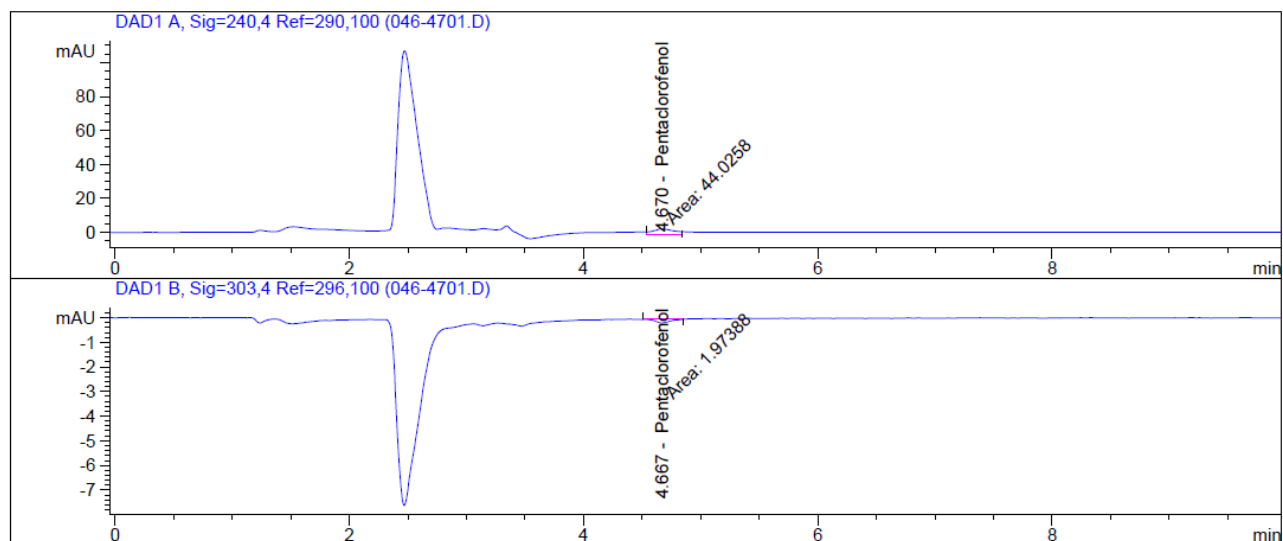
Control K1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



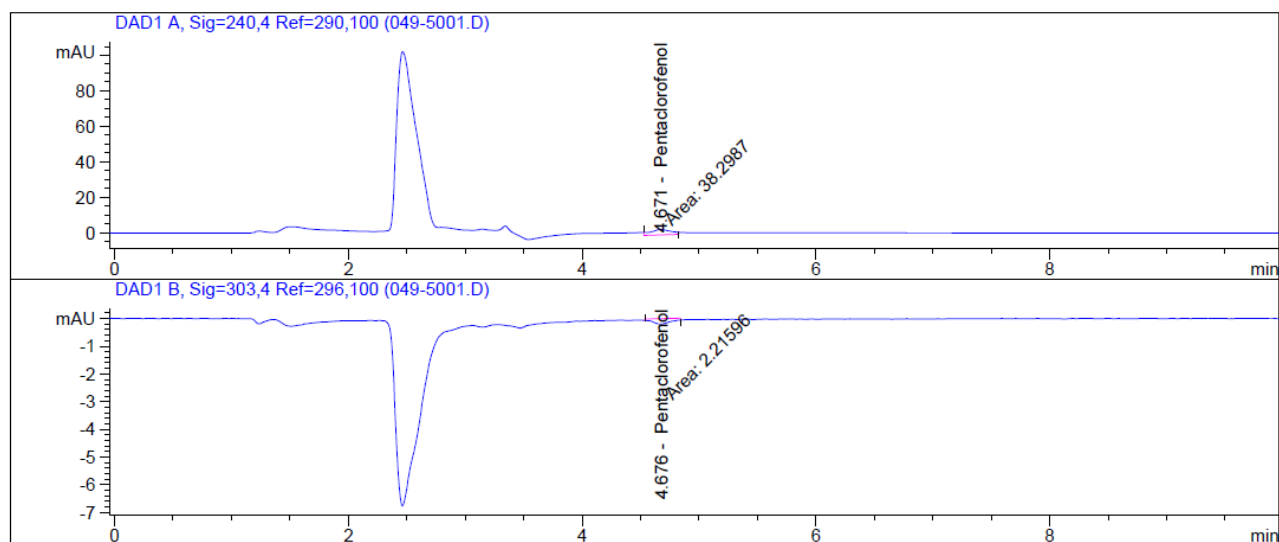
Control L1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



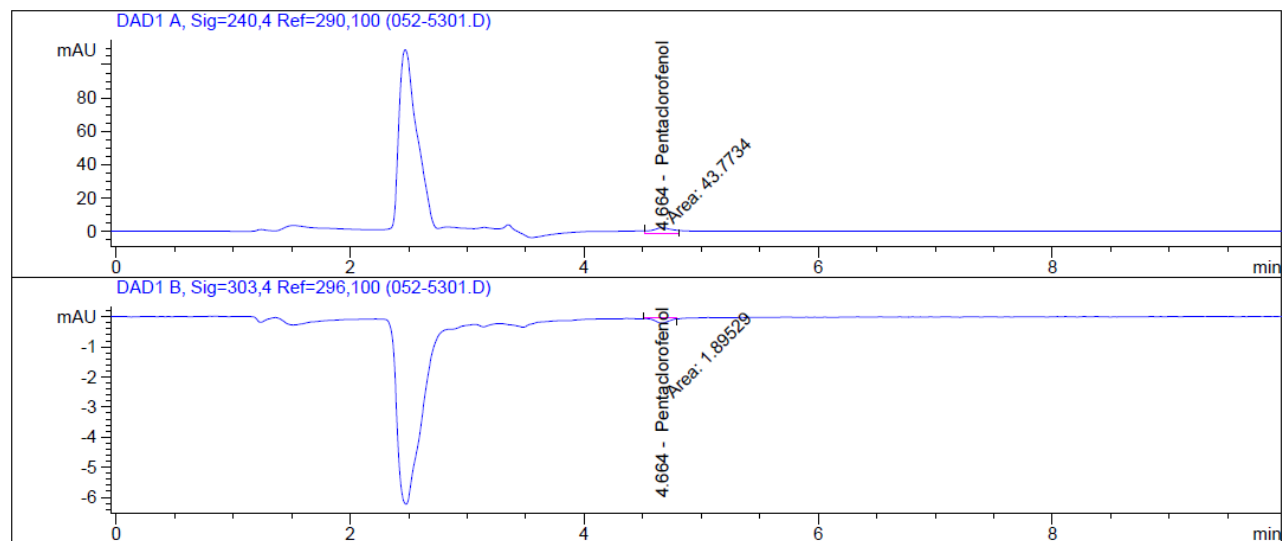
Control M1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



Control N1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



Control O1, con la señal A y B de arreglo de diodos:



Control P1, con la señal A y B de arreglo de diodos:

