

Facultad de Química



Proyecto de Estancia Estudiantil (1905)
Semestre 2026-1



Universidad Nacional
Autónoma de México

Química Analítica Sustentable y Espectrofotometría UV-visible

- **Alumno:** Meneses Sánchez José Gustavo (No. de cuenta 311175703).
- **Tutora:** Dra. María Teresa de Jesús Rodríguez Salazar.
- Departamento de Química Analítica, Facultad de Química.



Introducción

La Marea Dorada proveniente del Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB), y afecta a las costas de:

- África Occidental.
- del Caribe.
- las Guyanas.
- norte de Brasil.

(Davis et al., 2021; Siuda et al., 2024).

Distribución, principales especies y composición química reportada del sargazo



Tabla 1. Especies de sargazo reportadas por continente (Asia representando un total de 45%, América un 27%, Europa un 17% y África un 11%)

Continente	Especies de <i>Sargassum</i> Reportadas (de acuerdo con Rodríguez Salazar et al., 2025).	
América	<i>S. fluitans</i> (la más estudiada)	
	<i>S. natans</i> (la más estudiada)	
	<i>S. polyceratium</i>	
	<i>S. polyceratium</i> var. <i>ovatum</i>	
	<i>S. vulgare</i>	
	<i>S. buxifolium</i>	
	<i>S. filipéndula</i>	
	<i>S. furcatum</i>	
	<i>S. hystrix</i>	
	<i>S. ramifolium</i>	
	<i>S. sinicola</i>	
	<i>S. herporizum</i>	
	Asia	<i>S. polycistum</i> (la más estudiada)
		<i>S. wightii</i> (la más estudiada)
<i>S. homeri</i>		
<i>S. fusiforme</i>		
<i>S. ilicifolium</i>		
<i>S. angustifolium</i>		
<i>S. boveanum</i>		
<i>S. oligocystum</i>		
<i>S. hemiphyllum</i>		
<i>S. henslowianum</i>		
<i>S. fulvellum</i>		
<i>S. crassifolium</i>		
<i>S. swartzii</i>		
Europa		<i>S. muticum</i> (la más estudiada)
	<i>S. cf. portierianum</i>	
África	<i>S. elegans</i> (la más estudiada)	
	<i>S. fluitans</i>	
	<i>S. natans</i>	
	<i>S. obovatum</i>	
	<i>S. robillard</i>	
	<i>S. pfeifferae</i>	
	<i>S. vulgare</i>	
	<i>S. cinereum</i>	

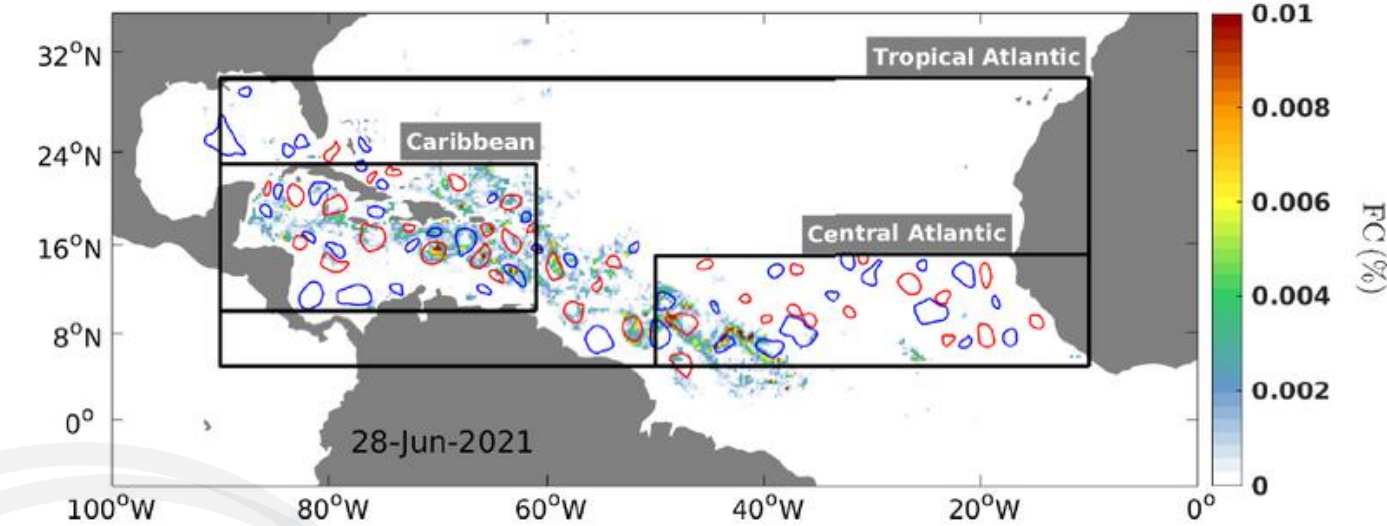
Tabla 2. Concentraciones y contenido reportado de algunos elementos y compuestos principales en diferentes especies de sargazo

Elemento	Clasificación	Rango de concentración reportado (µg/g DW)	Especie/Variación	Ubicación de muestreo	Fuente original
Arsénico (As)	EPT	58.32 - 64.91	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Arsénico (As)	EPT	29.0 - 172	<i>S. natans</i> , <i>S. fluitans</i>	Caribe Mexicano	(Rodríguez Salazar et al., 2025)
Cadmio (Cd)	EPT	0.40 - 0.77	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Cadmio (Cd)	EPT	0.32 - 2.6	<i>S. natans</i> , <i>S. fluitans</i>	Caribe Mexicano	(Rodríguez Salazar et al., 2025)
Plomo (Pb)	EPT	0.33 - 2.47	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Plomo (Pb)	EPT	<0.05 - 20.7	<i>S. natans</i> , <i>S. fluitans</i>	Caribe Mexicano	(Rodríguez Salazar et al., 2025)
Aluminio (Al)	EPT	187.70 - 427.57	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Aluminio (Al)	EPT	<LOD - 500	<i>S. fluitans</i> III, <i>S. natans</i> IVIII	Caribe Mexicano	(Rodríguez Salazar et al., 2025)
Zinc (Zn)	Micromineral	6.35 - 14.71	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Zinc (Zn)	Micromineral	3.65 - 80.54	<i>S. natans</i> , <i>S. fluitans</i>	Caribe Mexicano	(Rodríguez Salazar et al., 2025)
Hierro (Fe)	Micromineral	237.07 - 832.97	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Hierro (Fe)	Micromineral	<0.07 - 277.1	<i>S. natans</i> , <i>S. fluitans</i>	Caribe Mexicano	(Rodríguez Salazar et al., 2025)
Potasio (K)	Macromineral	28,701.30 - 32,865.84	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Calcio (Ca)	Macromineral	36,435.64 - 57,726.79	<i>S. natans</i> var. <i>natans</i> , <i>S. natans</i> var. <i>wingei</i> , <i>S. fluitans</i> var. <i>fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)

(Rodríguez Salazar et al., 2025; Davis et al., 2021).

(Rodríguez Salazar et al., 2025).

Figura 1. Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB)



La escala de color representa la proporción de cobertura de sargazo (Tomado de Sosa-Gutierrez et al., 2025)



Figura 2. Distribución continental de lugares de arribo de sargazo

(Tomado de Rodríguez Salazar et al., 2025).

(Tomado de Rodríguez Salazar et al., 2025).



Distribución, principales especies y composición química reportada del sargazo

Tabla 3. Tabla comparativa de analitos (metabolitos primarios y secundarios) encontrados comúnmente en diversas especies de sargazo

Compuesto bioquímico	Concentración/Contenido reportado	Especie/Variiedad	Ubicación de muestreo	Fuente
Alginato	9.36 - 12.18 % del peso seco	<i>S. natans var. natans</i> , <i>S. natans var. wingei</i> , <i>S. fluitans var. fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Fenoles Totales	1.20 - 3.11 mg PGE/g de peso seco	<i>S. natans var. natans</i> , <i>S. natans var. wingei</i> , <i>S. fluitans var. fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Florotaninos	0.39 - 0.91 mg PGE/g de peso seco	<i>S. natans var. natans</i> , <i>S. natans var. wingei</i> , <i>S. fluitans var. fluitans</i>	Jamaica	(Davis et al., 2021)
Fucoidano	7.09 - 7.18 %	Mezcla de especies pelágicas	Caribe Mexicano	(Paredes-Camacho et al., 2023)
Glucano	10.41 - 10.74 %	Mezcla de especies pelágicas	Caribe Mexicano	(Paredes-Camacho et al., 2023)
Galactano	5.16 - 5.59 %	Mezcla de especies pelágicas	Caribe Mexicano	(Paredes-Camacho et al., 2023)
Proteínas	5.47 - 8.30 %	Mezcla de especies pelágicas	Caribe Mexicano	(Paredes-Camacho et al., 2023)
Lípidos (Grasa)	5.36 - 6.02 %	Mezcla de especies pelágicas	Caribe Mexicano	(Paredes-Camacho et al., 2023)
Carbohidratos	32.38 - 38.77 %	Mezcla de especies pelágicas	Caribe Mexicano	(Paredes-Camacho et al., 2023)

(Davis et al., 2021; Paredes-Camacho et al., 2023)

Tabla 4. Comparación de niveles de contaminantes en sargazo con límites regulatorios (mg/kg en peso seco)

Elemento Potencialmente Tóxico (EPT)	Concentración máxima reportada en sargazo (México) (mg/kg)	Límite regulatorio (regulación europea) (mg/kg)	Límite regulatorio (norma mexicana aplicable) (mg/kg)
Arsénico (As)	172	3	0.35 (NOM 187)
Cadmio (Cd)	2.6	0.5	0.1 (NOM 187) / 0.5-2.0 (NOM 242)
Plomo (Pb)	20.7	5	0.5 (NOM 187) / 0.5-1.0 (NOM 242)
Zinc (Zn)	80.54	No especificado	40 (NOM 247)

(Rodríguez Salazar et al., 2025).

Introducción



Calibración y Verificación de un Espectrofotómetro UV-Visible

Ventajas principales de la espectrofotometría UV-visible

- Simplicidad y versatilidad operacional.
- Bajo costo.
- Técnica rápida.
- Fácil adopción.
- Equipos portátiles y de bajo costo.
- Preparación sencilla de muestra.
- Técnica no destructiva (la muestra o se destruye por lo que puede reutilizarse).
- Mantenimiento moderado.

(Ríos-Reina et al., 2022; Salsabiila et al., 2023; González-Morales et al., 2020).

(Hulme, 2019; Aparna et al., 2015)

La calificación de un espectrofotómetro UV-Visible es el proceso documentado que demuestra su aptitud para el propósito, asegurando que el instrumento es adecuado para el análisis previsto.

Tabla 5. Parámetros de rendimiento que deben ser verificados periódicamente:

Parámetro de rendimiento	Propósito
Exactitud de la Longitud de Onda	El monocromador del instrumento debe seleccionar la longitud de onda correcta.
Control (Exactitud) de la Absorbancia y Linealidad Fotométrica	La escala de absorbancia del instrumento debe ser correcta (exactitud) y la respuesta debe ser lineal en un rango de absorbancia definido.
Límite de luz parásita	La cantidad de luz de longitudes de onda no deseadas.
Ruido de la Línea Base	El ruido electrónico e instrumental intrínseco no interfiere significativamente.
Resolución	La capacidad del instrumento para distinguir entre dos características espectrales adyacentes.
Verificación de cubetas	Las celdas para la muestra y la referencia deben ser ópticamente idénticas.
Deriva Fotométrica	La estabilidad de la señal del instrumento a lo largo del tiempo.

Introducción



Validación de métodos analíticos

Estudios de laboratorio y evidencia documental de que los parámetros de desempeño del método (linealidad, repetibilidad, robustez, reproducibilidad, sensibilidad, límite de detección y de cuantificación, etc.), cumplen con criterios de aceptación para la aplicación analítica prevista.

(Pawar et al., 2025)

Incertidumbre de medición

- Parámetro que evalúa el error aleatorio y sistemático al caracterizar la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando con un % de confianza.
- Se debe calcular la incertidumbre expandida U , que depende del cálculo de la incertidumbre combinada, y un factor de cobertura k (generalmente igual a 2 para un 95% de confianza): $U = ku_c(y)$

(Rodrigues et al., 2023)

Sieber, 2020; Gorewoda et al., 2025; Outaki et al., 2024; Hosbas Coskun et al., 2021; Matschat et al., 2023

Materiales de referencia en química analítica

Tabla 6. Rol jerárquico de diferentes materiales de referencia (MR) de alto nivel de calidad en análisis cuantitativo y cualitativo.

Tipo de Material de Referencia (en orden jerárquico)	Características	Importancia o Uso
Estándar Nacional de Metrología / Estándar Primario (Primary Transfer Standard - PTS) (por ejemplo NIST, JRC, NMI Australia)	Emitido por organismo autorizado; máxima exactitud, trazabilidad y mínima incertidumbre. Requiere contenido, estabilidad y homogeneidad. Certificado por método primario.	Representan la unidad SI, validan métodos de prueba y establecen trazabilidad al SI. A veces sirven como estándares de calibración.
Estándar Compendial (por ejemplo USP, EP, BP, JP, IP)	Emitido por un organismo autorizado. La trazabilidad al estándar compendial primario es un requisito específico para los estándares secundarios farmacéuticos.	Proporciona trazabilidad para los estándares secundarios farmacéuticos.
Material de Referencia Certificado (MRC o CRM) (ISO 17034, 17025)	Máxima exactitud, mínima incertidumbre y trazabilidad SI; homogéneo, estable y certificado por proveedor acreditado.	Clave en pruebas analíticas: asegura exactitud, valida métodos, calibra instrumentos y mantiene trazabilidad.
Material de Referencia (MR o RM) (ISO 17034)	Cumple ISO menor que MRC; homogéneo, estable y con incertidumbre creciente según jerarquía.	Se usa para calibrar, evaluar, asignar valores, controlar calidad y evaluar instrumentos y matrices.
Estándar Analítico (ISO 9001)	Hay CoA; certificación, contenido, estabilidad y calidad dependen del productor.	En algunos casos, puede ser un material de control de calidad (Quality Control Material - QCM) que cumple con la Guía ISO 80.
Grado Reactivo / Químico de Investigación	Pueden incluir CoA, pero no son materiales de referencia; contenido, estabilidad y calidad dependen del productor.	No están caracterizados para ser utilizados como materiales de referencia.
Materiales de Referencia Certificados de Matriz (mCRMs) (Subconjunto de MRC, a menudo en la jerarquía de MRC)	Materiales con matriz específica, homogéneos, estables y trazables, que imitan muestras reales.	Sirven como referencia para métodos instrumentales, aseguran consistencia y exactitud en matrices complejas, y se usan para validar o calibrar métodos.

Introducción



Tabla 7. Los 12 Principios de la Química Verde

Principio	Significado	Referencia
Prevención	Prioriza evitar la generación de residuos desde el diseño del proceso.	(Doruk et al., 2025)
Economía atómica	Busca que todos los átomos de los reactivos se incorporen al producto final para maximizar la eficiencia.	(Doruk et al., 2025)
Síntesis de productos menos peligrosos	Promueve generar y usar sustancias con baja toxicidad; incluye alternativas más seguras a reactivos corrosivos.	(Doruk et al., 2025)
Diseño de productos químicos más seguros	Los productos deben cumplir su función con mínima toxicidad; se destacan formulaciones más efectivas y de baja dosis.	(Doruk et al., 2025)
Disolventes y auxiliares más seguros	Fomenta reducir o reemplazar disolventes peligrosos por opciones más inocuas como agua o fluidos supercríticos.	(Savitskaya et al., 2020)
Diseño para eficiencia energética	Minimiza el uso de energía favoreciendo condiciones suaves; la biocatálisis es un ejemplo clave.	(Sheldon, 2022)
Uso de materias primas renovables	Prefiere materias primas renovables, como biomasa para producir materiales como PLA.	(Doruk et al., 2025)
Reducir derivados innecesarios	Evita pasos de protección/desprotección que generan residuos; se buscan procesos más directos.	(Doruk et al., 2025)
Catálisis	Favorece catalizadores selectivos para aumentar eficiencia y reducir residuos, como en la síntesis mejorada de ibuprofeno.	(Doruk et al., 2025)
Diseño para la degradación	Los productos deben degradarse en compuestos inocuos al final de su uso; ejemplo: detergentes biodegradables.	(Doruk et al., 2025)
Análisis en tiempo real	Implementa monitoreo continuo (PAT) para prevenir la formación de sustancias peligrosas.	(Doruk et al., 2025)
Química intrínsecamente segura	Selecciona sustancias y condiciones que reduzcan riesgos de accidentes como incendios o explosiones.	(Doruk et al., 2025)

Química verde

Conjunto de principios y métricas cuyo objetivo es reducir el impacto ambiental de la química a nivel de enseñanza, investigación y industrial.

(Guerrero-Higareda & Carrillo-Nieves, 2025; Aydin Gunbatar et al., 2025; Pena-Pereira et al., 2020; Wojnowski et al., 2022; Sarfraz et al., 2022; Martínez-Pabello et al., 2022)

Tabla 8. Métricas de Química Verde más comunes basadas en evaluación de masa (cuantifican la cantidad de materia prima que se convierte en producto deseado frente a la que se convierte en residuo).

Métrica	Fórmula	Valor óptimo	Referencia
Factor Ambiental (E-factor)	$\text{Masa de residuos (kg)} / \text{Masa de producto (kg)}$	0	(Sheldon, 2022; Fantozzi et al., 2023)
Economía Atómica (AE)	$(\text{Peso molecular del producto} / \text{Suma de pesos moleculares de todos los reactivos}) * 100$	100%	(Trost, 1991; Fantozzi et al., 2023)
Intensidad de Masa del Proceso (PMI)	$\text{Masa total utilizada en el proceso (kg)} / \text{Masa de producto (kg)}$	1	(Sheldon, 2022)
Eficiencia de Masa de la Reacción (RME)	$\text{Masa de producto deseado (kg)} / \text{Masa total de todas las materias primas en el proceso (kg)}$	100%	(Fantozzi et al., 2023)
Rendimiento de Masa Efectivo (EMY)	$(\text{Masa de producto} / \text{Masa de reactivos no benignos}) * 100$	100%	(Martínez-Pabello et al., 2022)



Tabla 9. Métricas holísticas (integran múltiples dimensiones o fuentes de datos para dar una visión más completa del desempeño, del impacto o de la calidad del proceso).

Métrica	Resumen	Referencia
Eco- Escala	Método semicuantitativo que parte de 100 puntos y resta penalizaciones por reactivos peligrosos, alta energía o residuos; una puntuación cercana a 100 indica mayor ecologicidad y economía.	(Van Aken et al., 2006; Płotka-Wasyłka, 2018)
GAPI	Índice visual basado en un pictograma con colores (verde–amarillo–rojo) que evalúa 15 categorías del proceso analítico, desde la toma de muestra hasta los residuos; permite identificar etapas con mayor impacto ambiental.	(Płotka-Wasyłka, 2018; Mohamed et al., 2024)
AGREE	Software que asigna puntuaciones (0–1) a cada uno de los 12 principios de química analítica verde; genera un pictograma circular y una puntuación final. Incluye la extensión AGREEPrep para evaluar específicamente la preparación de muestras.	(Pena-Pereira et al., 2020; Pena-Pereira et al., 2022; Wojnowski et al., 2022; Mohamed et al., 2024)
WAC (Química Analítica Blanca)	Evalúa sostenibilidad analítica en tres ejes: rendimiento (rojo), impacto ambiental (verde) y eficiencia práctica (azul); su equilibrio determina el grado de “blancura” del método.	(Nowak et al., 2021; Mohamed et al., 2024)



- 1) Investigación Formativa a través de una Investigación Documental Especializada en las diversas especies de la macroalga parda del género *Sargassum* para:
- 2) Consultar la literatura reportada sobre análisis cualitativos y cuantitativos de interés farmacológico y farmacéutico utilizando espectrofotometría UV-Visible.
- 3) Identificar y analizar los criterios metrológicos empleados.
- 4) Identificar y evaluar la aplicación de los Principios de Química verde en las metodologías analíticas.
- 5) Procesar y Analizar la información que permitan evaluar fortalezas, debilidades y vacíos en la literatura existente.
- 6) Homologar los hallazgos con normatividad nacional e internacional vigente, identificando posibles oportunidades de mejora respecto a métodos normativos actualmente establecidos para el análisis del recientemente clasificado como recurso pesquero en México.
- 7) Diseñar una propuesta experimental sustentable para el análisis de un analito de interés farmacológico en el sargazo, que integre el uso de espectrofotometría UV-Visible, los criterios metrológicos identificados y los principios de química verde.
- 8) Elaboración de Infografía y presentación de seminario, con base en el análisis y procesamiento de la información de la investigación.
- 9) Difusión de los materiales resultantes en formato digital que se visualizará en la plataforma institucional AMyD de la Facultad de Química: <https://amyd.quimica.unam.mx/course/view.php?id=459§ion=2>.



El proceso de Investigación Documental Especializada permitirá confirmar y evaluar la aplicación de **principios de química verde** y **criterios metrológicos** robustos, en estudios donde se haya llevado a cabo análisis cuantitativos o cualitativos de analitos de interés **farmacológico o farmacéutico** en **extractos de sargazo**, y donde se haya utilizado la espectrofotometría UV-visible como técnica principal. Esta evaluación permitirá tanto la comparación de los hallazgos con el estatus regulatorio nacional e internacional actual para análisis de sargazo, como también la optimización preliminar de una metodología para el análisis de un analito en extracto de sargazo.



1. Definición del objetivo de búsqueda.

- Identificar estudios (2020–2025, inglés/español) que aplicaran espectrofotometría UV-Vis en el análisis de analitos presentes en extractos de sargazo con interés farmacéutico o farmacológico.

2. Selección y justificación de fuentes.

- Uso de la herramienta *Biblioteca Digital UNAM* como plataforma académica confiable.
- Consideración de artículos arbitrados y literatura científica especializada.

3. Estrategia de búsqueda sistemática.

- Filtros avanzados: “Proximity” y “Find all my search terms”.
- Rondas de búsqueda:
 - “sargassum” AND “uv-vis”
 - “sargazo” AND “uv-vis”
- Rango de publicación: 2020–2025.
- Resultado: 179 artículos recopilados.

4. Análisis del contenido de los artículos

- Evaluación individual de cada estudio en relación con:
 - Forma de aplicación de la espectrofotometría UV-Vis.
 - Especies de sargazo, analitos estudiados y tipo de resultados (cuantitativos o cualitativos).
 - Principios y métricas de Química Verde aplicadas.
 - Criterios metrológicos reportados (validación de métodos analíticos, mención de características de materiales de referencia, calibración y verificación de equipo, expresión de incertidumbre expandida, etc).

5. Revisión del estatus regulatorio y normativo

- Investigación del marco regulatorio vigente sobre sargazo en el ámbito nacional e internacional.
- Búsqueda de métodos normativos u oficiales aplicables a extractos de sargazo.

6. Síntesis y clasificación de información

- Integración de los hallazgos científicos y regulatorios en Base de Datos y Documento Integrador.
- Análisis de hallazgos e identificación de fortalezas, debilidades y/o oportunidades de mejora.
- Comparación entre los resultados obtenidos a partir de la ejecución de los pasos 4 y 5.



Tabla 10. Usos más relevantes de la espectrofotometría UV-visible en los estudios analizados.

Uso de la técnica de espectrofotometría UV-visible	Descripción breve de cada uso	Número de artículos que cumplen con el uso	Ejemplos sobresalientes de estudios	Importancia o relevancia farmacéutica
Caracterización y confirmación de la síntesis de nanopartículas	Se utiliza para monitorear la cinética de reacción y confirmar la formación de nanopartículas (NPs) (ej. Au, Ag, ZnO, CuO) mediante la detección de la banda de Resonancia de Plasmón Superficial (SPR) en el rango UV-visible. También se usa para inferir el tamaño y la estabilidad.	106	(López-Miranda et al., 2025), (Singaravelu et al., 2007), (Kingslin et al., 2023), (López-Miranda et al., 2023), (Rajeshkumar et al., 2022), (Hamouda & Aljohani, 2024), (Ghaemi & Gholamipour, 2017), (Molina et al., 2023), (Devi et al., 2022), (Solanki & Patel, 2022).	La confirmación de la síntesis verde de NPs (ej. Au-NP, Ag-NP) es crucial, ya que estas NPs tienen potencial como nanofármacos antimicrobianos, agentes anticancerígenos y materiales para suministro de fármacos debido a su baja toxicidad y biocompatibilidad.
Medición de actividad biológica	Se emplean ensayos colorimétricos acoplados a la espectrofotometría para cuantificar el potencial biológico de extractos o NPs. Esto incluye la medición de la capacidad antioxidante (DPPH, ABTS, FRAP), actividad antiinflamatoria (inhibición de desnaturalización proteica a 660 nm), y citotoxicidad (ensayo MTT a 540 o 570 nm).	89	(Abu-Khudir et al., 2021), (Kannan & Sivaperumal, 2025), (Wang et al., 2020), (Almutairi et al., 2024), (Ageeli & Mohamed, 2023), (Hsiao et al., 2022), (Choudhary et al., 2023), (Saraswati et al., 2019), (Landa-Cansigno et al., 2023).	Permite la determinación de parámetros clave como la Concentración Inhibitoria Media (IC50), esencial para establecer la potencia farmacológica de compuestos naturales contra el cáncer, diabetes o estrés oxidativo, validando su uso terapéutico.
Cuantificación de analitos (tanto metabolitos primarios como secundarios).	El UV-visible se utiliza para la cuantificación colorimétrica de compuestos bioactivos, como el Contenido Fenólico Total (TPC) (ej. a 760 nm con Folin-Ciocalteu), Contenido Total de Flavonoides (TFC), polisacáridos (ácidos urónicos, sulfatos) y pigmentos (clorofila, carotenoides, fucoxantina).	65	(El-Gendy et al., 2024), (Diego-González et al., 2023), (Emu et al., 2023), (Azcorra-May et al., 2024), (Guerrero-Higareda & Carrillo-Nieves, 2025), (Choudhary et al., 2023), (Ageeli & Mohamed, 2023), (Handayani et al., 2004).	Es un paso fundamental para la estandarización y control de calidad de extractos nutracéuticos, asegurando que el contenido de compuestos terapéuticos (como polifenoles y fucoïdanos) sea constante y adecuado para correlacionar la dosis con la respuesta biológica.
Uso de la técnica como control de calidad.	Se emplea para el monitoreo de procesos (ej. degradación catalítica de tintes), control de la estabilidad de NPs o la pureza de extractos, o para monitorear la liberación de fármacos encapsulados (ej. riboflavina a 444 nm).	33	(Zhao et al., 2023), (Kishore et al., 2025), (Namvar et al., 2015), (Subramanian et al., 2022), (Dalal et al., 2021), (Zhou et al., 2020), (López-Miranda et al., 2021), (Vinayagam et al., 2023).	Permite garantizar la calidad y estabilidad de materiales avanzados (nanomateriales, sistemas de liberación). En remediación, es crucial para monitorear la degradación de residuos farmacológicos (ej. metronidazol) o la detección de contaminantes tóxicos (ej. melamina).
Uso de la técnica acoplada a una previa separación cromatográfica.	El espectrofotómetro UV-visible se utiliza como detector (DAD/PDA) en técnicas como HPLC (Cromatografía Líquida de Alta Eficacia), UPLC, y SEC (Cromatografía de Exclusión por Tamaño). Esto permite la identificación y cuantificación específica de compuestos después de que han sido separados de la matriz compleja.	36	(Zhao et al., 2023), (Antunes et al., 2025), (Ye et al., 2021), (Mensah et al., 2023), (Jesus et al., 2023), (Guerrero-Higareda & Carrillo-Nieves, 2025), (Taniguchi et al., 2022), (Diego-González et al., 2023).	Este uso es vital para la estandarización y purificación de metabolitos secundarios clave (como la fucoxantina o polifenoles individuales), permitiendo el desarrollo de fármacos con alta pureza y la cuantificación precisa de impurezas potencialmente cancerígenas.



Tabla 11. Resumen del análisis de los hallazgos obtenidos a partir de la evaluación del uso de criterios metrológicos de interés en los estudios revisados

Criterio metrológico evaluado	No. de artículos que cumplen con el criterio	Ejemplo más común de cómo se cumple el criterio metrológico	Citas parentéticas de algunos ejemplos de artículos que cumplen con el criterio metrológico
Procedencia y tipo de material de referencia utilizado.	85 artículos (que incluyen cuantificación o bioensayos).	La práctica más común es mencionar el uso de estándares químicos puros o equivalentes (ej. ácido gálico, quercetina, ácido ascórbico, Trolox, BSA) y el precursor metálico, generalmente indicando la procedencia comercial (ej. Sigma-Aldrich, Merck, Himedia).	Yudiati et al., 2025; Al-Aadily et al., 2023; Marzban et al., 2022; Yudiati et al., 2025; Elattar et al., 2025; Ye et al., 2021; El-Sheekh et al., 2023; Ghadimi et al., 2025; Lee et al., 2023; Dalal et al., 2021; Colorado-Ríos et al., 2025; Ismail et al., 2023; Cunha dos Santos et al., 2024; Martínez-Molina et al., 2022; Samarathunga et al., 2025; Emu et al., 2023
Validación de métodos analíticos (cálculo o mención de parámetros de desempeño).	40	Se reporta la Linealidad mediante el coeficiente de correlación de las curvas de calibración o de los modelos cinéticos. También es común la mención de LOD/LOQ y la Exactitud a través de la Recuperación (%).	Antunes et al., 2025; Guan et al., 2022; Nandhini et al., 2024; Cunha dos Santos et al., 2024; Ahmad et al., 2022; Semaida et al., 2022; Prasedya et al., 2024; Pang et al., 2024
Cálculo y/o expresión de incertidumbre de medición (combinada y/o expandida).	0	Si bien prácticamente todos los estudios cuantitativos reportan la Desviación Estándar (SD), que cuantifica el error aleatorio, ninguno de los documentos presenta el cálculo formal de la Incertidumbre Combinada o Expandida.	Abu-Khudir et al., 2021; Rajeshkumar et al., 2022; Devi et al., 2022; Abu-Khudir et al., 2021; El Newehy et al., 2025; Elattar et al., 2025; Ye et al., 2021; Polo & Chow, 2020; Rajeswari et al., 2023; Younssi Tarhzouti et al., 2024; El-Behairy et al., 2023; Semaida et al., 2022; Costa et al., 2020; López-Miranda et al., 2021
Calibración, verificación del instrumento usado para la medición (espectrofotómetro UV-visible), ajustes, reparaciones, estudio de características metrológicas del equipo o confirmación del cumplimiento de requisitos metrológicos.	17	La verificación formal y documentada del espectrofotómetro UV-Vis (IQ/OQ/PQ) no es una práctica común. Los casos reportados involucran calibración de equipos complementarios trazables (ej. ICP-OES con NIST/CRM) o la calibración de instrumentos auxiliares (ej. pH metro con buffers).	Antunes et al., 2025; Kwon et al., 2024; Cunha dos Santos et al., 2024; Mmola et al., 2016; Bonilla Loaiza et al., 2022; Devi et al., 2022; Alzate-Gaviria et al., 2021; Alzate-Gaviria et al., 2021; Sun et al., 2024; Santana et al., 2024; Zhang et al., 2023



Tabla 12. Resumen del análisis de los hallazgos obtenidos a partir de la evaluación del uso de Principios y Métricas de Química Verde en los estudios revisados.

Principio de Química Verde	Descripción del principio	Número de artículos que cumplen con el principio	Forma más común en la que se cumple el principio	Citas parentéticas de algunos ejemplos de artículos que cumplen con el principio
P1: Prevención de residuos	Diseñar procesos químicos para minimizar o evitar la generación de residuos.	20	Valorización de la biomasa de <i>Sargassum</i> (alga invasora/residuo) como materia prima para productos de alto valor (nanopartículas, alginatos, bioestimulantes), evitando así su acumulación y descomposición contaminante.	(López-Miranda et al., 2025), (El-Gendy et al., 2024), (Mmola et al., 2018), (Guerrero-Higareda & Camillo-Nieves, 2025), (López-Miranda et al., 2021), (Macri et al., 2025).
P2: Economía Atómica	Diseñar síntesis que maximicen la incorporación de todos los materiales utilizados en el producto final.	3	Implementación de procesos integrados secuenciales (biorrefinería) para maximizar la conversión total de la biomasa o preparación de solventes eutécticos (ESs) con una eficiencia atómica del 100%.	(Saji et al., 2022), (El-Gendy et al., 2024), (Jesus et al., 2023).
P3: Síntesis de productos químicos menos peligrosos	Evitar el uso de reactivos tóxicos y generar productos y subproductos con poca o nula toxicidad.	20	"Síntesis verde" de nanopartículas (NPs) de metales (Au, Ag, ZnO, CuO) utilizando el extracto del alga como agente reductor y estabilizador, en lugar de químicos sintéticos tóxicos.	(Kingslin et al., 2023), (Devi et al., 2022), (El Newehy et al., 2025), (Veeragoni et al., 2023), (Namvar et al., 2015), (Hasan et al., 2023).
P4: Diseño de productos químicos más seguros	El producto final debe ser eficaz y mantener la mínima toxicidad posible para el medio ambiente y los humanos.	3	Desarrollo de alternativas de baja toxicidad (nanofármacos, tintes naturales, pesticidas biológicos) que sustituyen a los productos sintéticos peligrosos.	(Singaravelu et al., 2007), (Mardani-Talaei et al., 2025), (Ab Kadir et al., 2017).
P5: Disolventes y auxiliares más seguros	Minimizar el uso de auxiliares y priorizar el uso de disolventes inocuos.	40	Uso de agua (destilada o acuosa) o etanol/agua como disolvente principal de extracción o medio de reacción, siendo el agua el "solvente verde" preferido. El uso de Solventes Eutécticos Naturales (NADES) también se destaca.	(Abu-Khudir et al., 2021), (López-Miranda et al., 2023), (Jesus et al., 2023), (Gonzalez-Fuentes et al., 2020), (Mulasari et al., 2023), (Mulatier et al., 2024).
P6: Diseño para la eficiencia energética	Minimizar los requerimientos energéticos, realizando procesos a temperatura y presión ambiente.	18	Uso de técnicas de extracción intensificadas (UAE o MAE) para reducir drásticamente el tiempo de proceso y el consumo de energía en comparación con la extracción convencional, o realizar la síntesis de NPs a temperatura ambiente.	(Zhao et al., 2023), (Antunes et al., 2025), (Guerrero-Higareda & Camillo-Nieves, 2025), (Nie et al., 2021), (Kishore et al., 2025), (Wang et al., 2020).
P7: Uso de materias primas renovables	Utilizar recursos renovables siempre que sea posible.	50	Uso de la macroalga marina <i>Sargassum</i> (biomasa abundante/invasora) como materia prima para extractos, síntesis de NPs, alginatos, o biocombustibles, desplazando materiales no renovables.	(López-Miranda et al., 2025), (Lee et al., 2023), (Elattar et al., 2025), (Prasedya et al., 2022), (Bonilla Loaiza et al., 2022), (Polo & Chow, 2020).
P8: Reducir derivados innecesarios	Evitar la derivatización temporal (protección/desprotección) para reducir los pasos de reacción.	2	Simplificación de la ruta sintética de moléculas complejas, como en la síntesis de un intermedio clave de Losartán, eliminando pasos de protección/desprotección, o la combinación de procedimientos en un solo paso (ej. MSPD).	(Antunes et al., 2025), (Jesus et al., 2023).
P9: Catálisis	Preferir reactivos catalíticos y selectivos a los estequiométricos.	4	Uso de nanopartículas de metales (Pd, Ag, Au), sintetizadas ecológicamente, como nanocatalizadores reciclables y eficientes para la degradación de contaminantes, o el uso de enzimas (biocatálisis).	(Antunes et al., 2025), (Song et al., 2022), (Zhao et al., 2023), (Rajeshkumar et al., 2021).
P10: Diseño para la degradación	Diseñar productos que, al final de su función, se descompongan en productos inofensivos.	4	Desarrollo de películas y andamios biodegradables (basados en alginato o quitosano) que se descomponen en el medio ambiente o son absorbidos por el cuerpo sin dejar residuos persistentes.	(Jeddi et al., 2022), (Zhang et al., 2023), (Spagnuolo et al., 2025), (Mardani-Talaei et al., 2025).
P11: Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación	Monitorear y controlar el proceso para evitar la formación de subproductos peligrosos.	3	Uso de técnicas analíticas instrumentales avanzadas (HPLC-MS/MS, NIR) que permiten el monitoreo y la caracterización precisa y rápida del proceso.	(Younssi Tarhzouti et al., 2024), (Ghasemi et al., 2024), (Zou et al., 2023).
P12: Química intrínsecamente segura para la prevención de accidentes	Elegir sustancias y formas químicas que minimicen el potencial de accidentes.	4	La síntesis verde (biorreducción) de nanopartículas, que se realiza en condiciones suaves (temperatura ambiente/baja) y evita reactivos inflamables o explosivos, resultando en un método inherentemente más seguro.	(Ghaemi & Gholamipour, 2017), (Molina et al., 2023), (Veeragoni et al., 2023), (Farokhnia et al., 2017).



Tabla 13. Resumen de la Regulación de Acceso, Recolección y Manejo Ambiental.

Aspecto Regulatorio	Regulación/Entidad (México)	Regulación/Entidad (Internacional)	Implicación Clave
Clasificación Legal (México)	Anteriormente: Residuo de Manejo Especial.	Variable según jurisdicción.	Clasificación como "residuo" generaba alta carga administrativa y riesgo para inversores farmacéuticos.
Clasificación Actual (México)	Recurso Pesquero (clasificado el 6 de agosto de 2025) en la Carta Nacional Pesquera (CNP) bajo la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables (LGPAS).	Tratamiento como macroalga/recurso biológico renovable.	Implica una transición de manejo de emergencia a manejo técnico, sostenible y de aprovechamiento económico.
Entidades Regulatorias (Recolección en Mar)	CONAPESCA (principal) en coordinación con IMIPAS. SEMAR y CONANP (para Áreas Naturales Protegidas - ANP).	Protocolo SPAW del Convenio de Cartagena (obliga a proteger áreas y especies). Leyes Federales de EE. UU. (Especies en Peligro, Agua Limpia).	La recolección en altamar requiere Permisos de Pesca de CONAPESCA y debe minimizar la captura de fauna de acompañamiento.
Trazabilidad y Calidad de la Materia Prima	Simsar (Sistema de Monitoreo del Sargazo Recolectado) coordina la información <i>in situ</i> . Lineamientos Técnicos SEMARNAT (Buenas Prácticas de Recolección).	EMA Guideline on GACP (Buenas Prácticas de Recolección). USDA (métodos no destructivos).	La trazabilidad (origen, fecha, método) es el punto de partida para garantizar la calidad del producto final farmacéutico (API o excipiente).
Bioprospección	Obligación de cumplir con el Protocolo de Nagoya (PIC y MAT), aunque el marco de implementación es débil en México.	Protocolo de Nagoya (Acceso a los Recursos Genéticos y Participación Justa y Equitativa en los Beneficios).	El cumplimiento otorga certidumbre jurídica superior para impulsar la investigación y la inversión extranjera

Tabla 14. Resumen de la Regulación de Calidad Farmacéutica y Producto Final.

Aspecto Regulatorio	Marco Nacional (México)	Marco Internacional (ICH/EMA/FDA)	Requisito Clave
Manufactura (GMP)	NOM-164-SSA1-2015 (para medicamentos), NOM-059-SSA1-2015 (para API).	ICH Q7 (Good Manufacturing Practice for Active Pharmaceutical Ingredients).	Capacidad de producir consistentemente un API de alta pureza y composición definida.
Registro Sanitario	COFEPRIS es la entidad responsable. Vía menos compleja: remedio herbolario o nutraceutico. Vía rigurosa: medicamento nuevo (para aplicaciones farmacológicas novedosas).	EMA (evaluación y supervisión) y FDA.	Necesario para la comercialización. La vía de nutraceutico limita el valor comercial, pero permite validar el control de contaminantes.
Límites de Contaminantes Elementales	No existen NOMs específicas para extractos de sargazo.	ICH Q3D (Elemental Impurities). USP 43-NF 38 (2020) Capítulo 232 (As, Cd, Pb, Hg).	Cumplimiento obligatorio a nivel global para APIs. El sargazo presenta un riesgo alto de As debido a la biosorción.
Estandarización y Caracterización	Requisito de identidad y pureza bajo Buenas Prácticas de Manufactura (verificado por COFEPRIS).	Farmacopeas (ej. Farmacopea Europea, China). ICH (estabilidad, impurezas).	Es esencial estandarizar la estructura molecular y propiedades de biopolímeros (ej. proporción M/G en alginatos, peso molecular de fucoidanos) para correlacionar con la actividad biológica.
Evaluación de Riesgo Ambiental	La Agenda de CONACYT considera lixiviados y residuos.	EMA Guideline on the environmental risk assessment (2024).	Para nuevos compuestos (derivados de sargazo), se exige evaluar la persistencia, bioacumulación y toxicidad



Tabla 15. El Desafío Crítico de la Contaminación por Metales (ICH Q3D)

Riesgo/Estándar	Detalle del Problema	Implicación Regulatoria y Económica	Soluciones de Detoxificación (Ejemplos)
Problema Principal	Alta capacidad del sargazo para la biosorción de contaminantes elementales (Arsénico (As), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Hierro (Fe), etc.) debido a la presencia de alginatos y fucoidan en su pared celular.	Riesgo Alto, ya que el As es altamente frecuente en el sargazo. El costo de desarrollar un proceso de purificación validado (ICH Q7) para reducir el As es considerable.	Procesamiento con agua caliente (90°C) seguido de tratamiento con ácido cítrico.
Límite Crítico (ICH Q3D)	Arsénico (As): Límite de Exposición Diaria Permitida (PDE) para vía oral es de 15 µg/día.	El proceso de manufactura debe reducir consistentemente el As y otros metales Clase 1 por debajo de este umbral.	Inclusión de fermentación (ej. con <i>Lactobacillus rhamnosus</i>) para alcanzar la máxima remoción de As.
Toxicidad Clave	Los cuatro elementos más ubicuos y tóxicos que deben evaluarse son As, Cd, Pb y Hg.	La viabilidad económica depende de que el valor del API purificado justifique el costo de la descontaminación.	Carbonización Hidrotermal (HTC), que estabiliza los metales en fases sólidas/líquidas. Extracción con Solventes Eutécticos Profundos (DES) para recuperar metales (ej. 98% de Cd).

Tabla 16. Ejemplo de Monografía de Sargassum (Farmacopea China)

Parámetro Analítico	Especie Analizada	Requisito de Aceptación/Método	Rol de Espectrofotometría UV-visible
Identificación	<i>Sargassum pallidum</i> y <i>Sargassum fusiforme</i> (Hái Zǎo).	Identificación química (precipitado marrón al añadir tricloruro de hierro) y organoléptica (olor, sabor).	No aplica directamente al análisis de identificación.
Metales Pesados	Hái Zǎo	Plomo (mg/Kg), Cadmio (mg/Kg), Mercurio (mg/Kg).	Medición mediante técnicas avanzadas (espectrofotometría de absorción atómica o espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente).
Contenido de Polisacáridos	Hái Zǎo	No inferior al 1.70% (calculado como fucosa, base seca).	Cuantificación por Espectrofotometría UV-visible a 580 nm (usando curva estándar de fucosa), luego de hidrólisis.
Contenido de Humedad	Hái Zǎo	No debe exceder el 19.0% (Método 2 de la Regla General 0832).	No aplica.

Análisis de resultados

Propuesta de optimización de protocolo analítico



“*Cuantificación de polifenoles totales (PFT) en macroalgas mediante espectrofotometría UV-Vis ($\lambda=280$ nm) con estándar externo de ácido gálico*”, pertenece al conjunto de métodos analíticos descritos en el documento “*CUADERNILLO DE PROPUESTAS EXPERIMENTALES PARA PRÁCTICAS, CON APLICACIÓN A LA MATRIZ MACROALGAS* de Rodríguez Salazar et al. (2025). Se ha utilizado como referencia para evaluar la viabilidad de su mejora.

Materiales y equipo

- **Materiales de referencia y estándares**
 - Material de Referencia Certificado (MRC) de ácido gálico (grado ISO 17034), obligatorio para garantizar trazabilidad metrológica al SI. Debe contar con:
 - Certificado de pureza.
 - Incertidumbre expandida ($k=2$).
 - Declaración o carta de trazabilidad.
 - Solución stock de ácido gálico preparada a partir del MRC.
- **Reactivos**
 - Etanol 70%.
 - Agua desionizada.
 - Ácido fosfórico (solo si estrictamente necesario para estabilizar el estándar).
 - Metanol solo como referencia, pero se sugiere eliminarlo para cumplir Principio 3 y 5 de Química Verde.
- **Equipos:**
 - Espectrofotómetro UV-Visible calibrado y verificado.
 - Balanza analítica calibrada.
 - Material volumétrico clase A.
 - Centrifuga, agitador magnético y homo.

Preparación de la muestra

- **Secado y homogeneización**
 1. Pesar 10–15 g de macroalga.
 2. Secar a 60 °C hasta masa constante (<4% variación).
 3. Pulverizar y tamizar (#30).
 4. Conservar en desecador.

Extracción verde de polifenoles

Se selecciona etanol 70% / agua 30% por ser un solvente GRAS, renovable permitiendo una disminución del valor durante cálculo de E-Factor (se verá con más detalle adelante).

- **Procedimiento**
 - Pesar 0.5 g de muestra tamizada.
 - Transferir a un vaso de 50 mL.
 - Agregar 20 mL de etanol 70%.
 - Sonicar 30 min (sustituye maceración de 1 semana —Principio 6 eficiente energética).
 - Dejar reposar 24 h a temperatura ambiente.
 - Centrifugar 3500 rpm, 10 min.

- Filtrar y aforar a 25 mL.
- **Observaciones para asegurar sustentabilidad:**
 - Evitar metanol: suprime toxicidad (Principio 3).
 - Acortar tiempos de extracción: reduce energía (P6).
 - Evitar múltiples diluciones innecesarias: reduce valor E-factor.

Preparación de la curva de calibración

- **Solución Stock (500 mg/L)**
 1. Disolver la masa correspondiente del MRC de ácido gálico, utilizando su pur certificada:
$$i. m_{\text{corregida}} = \frac{m_{\text{nominal}}}{\text{Pureza}}$$
 2. Registrar incertidumbre u_{MRC} del MRC.
 3. Preparar al menos 6 niveles en el rango 2–15 mg/L.

Medición

1. Calentar lámpara del espectrofotómetro 20 min.
2. Leer blanco.
3. Medir absorbancia de estándares.

Cualificación, Calibración y Verificación del Espectrofotómetro (PQ)

Antes de usar el equipo:

- **Exactitud de longitud de onda**
 - Usar filtro certificado de óxido de holmio.
 - Aceptación: desviación ≤ 1 nm en picos característicos.
- **Exactitud fotométrica**
 - Utilizar solución certificada de dicromato de potasio o filtros de densidad neutra.
 - Verificar linealidad en 0.2–1.0 AU.
- **Luz parásita**
 - Usar solución de corte (p. ej., KCl al 1.2%).
 - Valores permitidos según especificación del fabricante.
- **Ruido de línea base**
 - Registrar estabilidad del blanco durante 5 min.
 - Fluctuación aceptable: ≤ 0.002 AU.

Registrar toda la información de calibración, fecha, certificados y condiciones ambientales.

Validación completa del método

Se debe documentar cada parámetro de acuerdo con ICH Q2(R2) y Eurachem:

- **Selectividad**
 - Evaluar absorbancia de extractos sin polifenoles añadidos.
 - Confirmar ausencia de interferencias a 280 nm.
- **Linealidad**
 - Regresión lineal (mín. 6 niveles).
 - Criterios:
 - $R^2 \geq 0.999$
 - Análisis de residuos
 - Prueba de Mandel para curvatura
- **Precisión**
 - **Repetibilidad**
 - 6 réplicas el mismo día.
 - **Precisión intermedia**
 - 3 días distintos
 - 2 analistas
 - 2 equipos (si aplica)
- **Exactitud (veracidad)**
 - Ensayo de adición y recuperación al 80, 100 y 120%.
 - Rango aceptable: 95–105%.
- **LOD y LOQ**
 - Usando desviación estándar del blanco (σ) y pendiente (S):
$$LOD = \frac{3.3\sigma}{S}$$
$$LOQ = \frac{10\sigma}{S}$$
- **Robustez**
 - Evaluar variaciones deliberadas:
 - pH ± 0.2
 - %EtOH $\pm 2\%$
 - Temperatura de extracción ± 2 °C
 - Tiempo de sonicación $\pm 10\%$

Cálculo de concentración en muestras

- Usar la ecuación de la regresión y aplicar correcciones de dilución.

Cálculo de incertidumbre.

- Aplicar enfoque *Top-Down*, combinando:
 - Incertidumbre por precisión:
$$u_{\text{precisión}} = s_{\text{repetibilidad}}$$
 - Incertidumbre por sesgo:
$$u_{\text{sesgo}} = |C_{\text{recuperado}} - C_{\text{real}}|$$
 - Incertidumbre combinada:
$$u_c = \sqrt{u_{\text{precisión}}^2 + u_{\text{sesgo}}^2 + u_{MRC}^2}$$
 - Incertidumbre expandida:
$$U = k \cdot u_c, \text{ con } k = 2$$
- Reporte de resultado:
 - El resultado final debe reportarse como:
$$PFT = X \pm U \text{ mg de equivalentes de ácido gálico/g peso seco}$$

Integración de Química Verde

- Eliminación de metanol: P3 y P5.
- Reducción del tiempo de extracción: P6.
- Reducción de volumen de solvente de 20 mL a 15 mL si valida robustez: P1 y P5.
- Miniaturización del método: permitir análisis con 0.25 g de muestra (disminuye valor de la métrica PMI).
- Uso de agua y etanol renovable (bioetanol por ejemplo): P7.

Métricas cuantitativas de Química Verde

- Factor E:
 - $E = \frac{\text{Masa de residuos}}{\text{Masa de muestra}}$
 - Debe calcularse considerando:
 - Solventes no reciclables
 - Papel filtro
 - Consumibles.
- **PMI**
 - $PMI = \frac{\text{Masa total de entradas}}{\text{Masa de muestra}}$

Valores más bajos indican mayor sostenibilidad.

Conclusiones



01

La espectrofotometría UV-Vis es la técnica más utilizada principalmente para confirmación y caracterización de nanopartículas, ensayos colorimétricos para medir actividad biológica y cuantificar metabolitos con y en extractos de sargazo.

02

Se identificó un uso limitado de aplicaciones avanzadas de UV-Vis (derivadas, quimiometría), lo que restringe la optimización de análisis en matrices complejas.

03

La literatura muestra debilidades en criterios metrológicos: ausencia de validación analítica formal, nulo reporte de incertidumbre de medición y débil trazabilidad metrológica.

Conclusiones

04

Los estudios aplican principios de Química Verde (uso de materia prima renovable y solventes seguros), pero rara vez emplean métricas cuantitativas (Factor E, PMI, Economía Atómica), lo que dificulta evaluar objetivamente la sostenibilidad de los procesos.

05

La revisión regulatoria revela un panorama de transición. El mayor reto para usos farmacéuticos es su alta biosorción de metales, especialmente arsénico, que supera límites internacionales.

06

No existen NOMs mexicanas específicas para extractos de sargazo; se requiere una regulación técnica o NOM emergente. El antecedente de la Farmacopea China demuestra que métodos UV-Vis pueden estandarizar polisacáridos

Agradecimientos



UNAM

Proyecto DGAPA-UNAM-PAPIME PE201324

Departamento de Química Analítica, Facultad de Química

Dr. José Luz González Chávez, Jefe del Departamento de Química

**Dra. Domínguez Ramírez Lila Lubianka, Coordinadora de la carrera de Química
Farmacéutico Biológica**

Bárbara Alejandra Lerate Rosales, Secretaria de Apoyo de la Coordinación QFBs

Dra. Mabel Clara Fragoso Serrano, Miembro del CAEE.



Bibliografía básica



- Lopez-Miranda, J.L.; Molina, G.A.; González-Reyna, M.A.; España-Sánchez, B.L.; Esparza, R.; Silva, R.; Estévez, M. Antibacterial and Anti-Inflammatory Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized by a Green Method Using Sargassum Extracts. *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24, 1474.
- Al-Aadily, I.R.J., Bajilan, S.I., Al-Koofee, D.A.F., & Al-Marzoqi, A.H. Anticancer Effect of Sargassum oligocystom Hydroalcoholic Extract Against SW742, HT-29, WiDr, and CT-26 Colorectal Cancer Cell Lines and Expression of P53 and APC Genes. *Journal of Gastrointestinal Cancer* 2023, 54:62–66.
- Karkhane, M., Lashgarian, H. E., Mirzaei, S. Z., Ghaffarizadeh, A., cherghipour, K., Sepahvand, A., & Marzban, A. (2020). Antifungal, antioxidant and photocatalytic activities of zinc nanoparticles synthesized by Sargassum vulgare extract. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29, 101791.
- Kim, K. W., Chung, D., Jung, S.-H., Kwon, Y. M., Kim, J. Y. H., & Baek, K. (2022). Antimicrobial Effect of Carbon Nanodots–ZnO Nanocomposite Synthesized Using Sargassum horneri. *J. Mar. Sci. Eng.*, 10(10), 1546.
- Abu-Khudir, R., Ismail, G. A., & Diab, T. (2021). Antimicrobial, Antioxidant, and Anti-Tumor Activities of Sargassum linearifolium and Cystoseira crinita from Egyptian Mediterranean Coast. *Nutrition and Cancer*, 73(5), 829–844.
- Sudirman, S.; Putra, A. A. F. D.; Herpandi, H.; Widiastuti, I.; Lestari, S.; Ridhowati, S.; Janna, M. (2025). Antioxidant activity of Brown Seaweed Sargassum sp. extract from Tanjung Tinggi Beach, Belitung Island. *International Journal of Secondary Metabolite*, 12(3), 582–592. <https://doi.org/10.21448/ijsm.1588401>.
- Deenathayalan, and Brindha, D. (2022). Antioxidant potential of biosynthesized zinc oxide nanoparticles from Sargassum polycystum aqueous extract. *Research Journal of Biotechnology*, 17(7), 62–90.
- Rajeshkumar, S.; Parameswari, R. P.; Jayapriya, J.; Tharani, M.; Ali, H.; Aljarba, N. H.; Alkahtani, S.; Alarifi, S. (2022). Apoptotic and Antioxidant Activity of Gold Nanoparticles Synthesized Using Marine Brown Seaweed: An In Vitro Study. *BioMed Research International*, 2022, 5746761. <https://doi.org/10.1155/2022/5746761>.
- Catarino, M.D.; Silva-Reis, R.; Chouh, A.; Silva, S.; Braga, S.S.; Silva, A.M.S.; Cardoso, S.M. Applications of Antioxidant Secondary Metabolites of Sargassum spp. *Mar. Drugs* 2023, 21, 172. <https://doi.org/10.3390/md21030172>
- Hamouda, R.A.; Aljohani, E.S. Assessment of Silver Nanoparticles Derived from Brown Algae Sargassum vulgare: Insight into Antioxidants, Anticancer, Antibacterial and Hepatoprotective Effect. *Mar. Drugs* 2024, 22, 154. <https://doi.org/10.3390/md22040154>
- Rodríguez Salazar, M. T. de J., Santos Trejo, C., Silva Mata, D. E., Vitela Escudero, F. I., Sustayta Azuara, M. A., Vera Jiménez, M. I., Rodríguez Pacheco, O. U., & Salcedo Mendoza, R. (2025). Cuadernillo de propuestas experimentales para prácticas, con aplicación a la matriz macroalgas. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Química Analítica.
- Rodríguez Salazar, M. T. J., González Chávez, J. L., Gutiérrez Sánchez, C., Skladal Méndez, A., Morales Velázquez, A. J., Mendoza Solís, E. E., Ibarra Contreras, R., & López Santiago, N. R. (2025). Sargassum spp. (Phylum: Ochrophyta, Class: Phaeophyceae): Elemental analysis and spatial distribution approximation (Review). *Cymbella*, 11(1), 63–87. <https://doi.org/10.22201/fc.24488100e.2025.11.1.3>

Bibliografía básica



- Davis, D., Simister, R., Campbell, S., Marston, M., Bose, S., McQueen-Mason, S. J., Gomez, L. D., Gallimore, W. A., & Tonon, T. (2021). Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds *Sargassum fluitans* and *S. natans* (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. *Science of the Total Environment*, 762, 143134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143134>
- Paredes-Camacho, R. M., González-Morales, S., González-Fuentes, J. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Benavides-Mendoza, A., Charles-Rodríguez, A. V., & Robledo-Olivo, A. (2023). Characterization of *Sargassum* spp. from the Mexican Caribbean and Its Valorization through Fermentation Process. *Processes*, 11(3), 685. <https://doi.org/10.3390/pr11030685>
- Aparna, C. H., & Gowrisankar, D. (2015). A review on calibration of analytical instruments. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 5(3), 572–582.
- Pawar, A., Shinde, S., Baokar, S., & Patil, R. (2025). Analytical Method Validation: ICH and USP Perspectives. *International Journal of Research and Review*, 12(8).
- VANCHA, H., TEWARI, D., KUMAR, R., GOVINDAIAH, P., MOHD, S., SINGH, S. K., & GULATI, M. (2023). Analytical Quality by Design Driven Development and Validation of UV-Visible Spectrophotometric Method for Quantification of Xanthohumol in Bulk and Solid Lipid Nanoparticles. *Turk J Pharm Sci*, 20(3), 165–175.
- Savitskaya, T., Kimlenka, I., Lu, Y., Hrynshpan, D., Sarkisov, V., Yu, J., Sun, N., Wang, S., Ke, W., & Wang, L. (2021). *Green Chemistry—Process Technology and Sustainable Development*. Zhejiang University Press.
- Guerrero-Higareda, S., & Carrillo-Nieves, D. (2025). Green extraction cascade of UV-absorbing compounds, alginate, and fucoidan from *Sargassum* using ethanol and natural deep eutectic solvents. *Heliyon*, 11(e41810).
- Colacino, E., & García, F. (Eds.). (2023). *Mechanochemistry and Emerging Technologies for Sustainable Chemical Manufacturing*. CRC Press.
- Imam, M. S., & Abdelrahman, M. M. (2023). How environmentally friendly is the analytical process. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*.
- Gorewoda, T., Kostrzewa, J., Wolska, M., Jamroz, E., & Anyszkiewicz, J. (2025). Matrix Certified Reference Materials. *Encyclopedia*, 5, 76.
- Outaki, M., Loukhamas, S., Gmouh, S., & Kerak, E. (2024). Reference Materials: A review. *Journal of the Turkish Chemical Society Chemistry*, 11(2), 751–764.
- Hosbas Coskun, S., Wise, S. A., & Kuszak, A. J. (2021). The Importance of Reference Materials and Method Validation for Advancing Research on the Health Effects of Dietary Supplements and Other Natural Products. *Frontiers in Nutrition*, 8, 786261.