

Cuantificación de metales pesados del sargazo que arriba a las costas del estado de Quintana Roo

Alberto Pereira Corona
Patricia Fragoso Servón
Benito Prezas Hernández
Carlos Alberto Niño Torres
Joshua Sérvulo Baeza

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México

María del Pilar Blanco Parra
Cátedra CONACYT

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n27p120](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n27p120)

Submitted: 08 May 2026

Accepted: 28 September 2026

Published: 30 September 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Pereira Corona, A., Fragoso Servón, P., Prezas Hernández, B., Niño Torres, C.A., Sérvulo Baeza, J., & Blanco Parra, M.P. (2026). *Cuantificación de metales pesados del sargazo que arriba a las costas del estado de Quintana Roo*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (27), 120. <https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n27p120>

Resumen

El objetivo del trabajo fue medir las concentraciones de algunos metales pesados y metaloides presentes en el sargazo que arriba a las costas de Quintana Roo y evaluar estos resultados respecto a los valores permisibles de acuerdo con normas oficiales mexicanas. Se presentan resultados del análisis de metales pesados en muestras de *S. fluitans* y *S. natans* colectado vivo en mar abierto frente a Quintana Roo, México. Se tomaron 808 muestras con dos réplicas cada una a lo largo de 29 transectos perpendiculares a la costa. Las muestras se separaron en sus componentes por especie y fueron secadas a baja temperatura para su análisis por espectrometría de absorción atómica. Se detectaron altas concentraciones de arsénico, cromo, cadmio, plomo y níquel entre otros metales. Los resultados muestran amplias variaciones interanuales y escasas variaciones espaciales. *S. fluitans* aparenta una mayor capacidad de absorción de metales pesados que *S. natans*. Las concentraciones de metales pesados en todos los casos son mayores a los máximos admitidos por normas nacionales e internacionales para consumo humano o contacto. Se recomienda la realización de estudios tendientes a evaluar la posibilidad de remoción de

los metales pesados contaminantes antes del uso del material para procesos o usos que pudieran transferir estos contaminantes a otros ecosistemas y sitios en la geografía de Quintana Roo.

Palabras clave: Contaminación, arribazones, Phaeophyceae, algas pardas, Mar Caribe

Quantification of Heavy Metals in Sargassum Arriving on the Coasts of the State of Quintana Roo, Mexico

Alberto Pereira Corona
Patricia Fragoso Servón
Benito Prezas Hernández
Carlos Alberto Niño Torres
Joshua Sérvulo Baeza

Autonomous University of the State of Quintana Roo, Mexico

María del Pilar Blanco Parra
Cátedra CONACYT

Abstract

The objective of this study was to measure the concentrations of certain heavy metals and metalloids in the sargassum washing up on the coast of Quintana Roo and to evaluate these results against permissible limits established by official Mexican standards. The study presents results from heavy metal analyses of *S. fluitans* and *S. natans* samples collected while alive in open waters off the coast of Quintana Roo, Mexico. A total of 808 samples—two replicates each—were collected along 29 transects perpendicular to the coastline. The samples were separated by species and dried at low temperatures prior to analysis via atomic absorption spectrometry. High concentrations of arsenic, chromium, cadmium, lead, and nickel, among other metals, were detected. The results reveal significant interannual variation but minimal spatial variation. *S. fluitans* appears to possess a greater capacity for heavy metal absorption than *S. natans*. In all cases, heavy metal concentrations exceeded the maximum limits permitted by national and international standards for human consumption or contact. Further studies are recommended to evaluate the feasibility of removing these heavy metal contaminants before the material is used in processes or applications that could transfer the contaminants to other ecosystems and locations within Quintana Roo.

Keywords: Pollution, arrivals, Phaeophyceae, brown algae, Caribbean Sea

Introduction

En las costas del mar Caribe es común el recale de diversos materiales vegetales, tanto de origen marino como terrestre. Sin embargo, las arribaciones masivas de sargazo (*Sargassum spp.*) registradas en la región durante los últimos años constituyen un fenómeno relativamente reciente y sin precedentes por su magnitud (Franks et al., 2011; Gower et al., 2013). Aunque la presencia de sargazo flotante en el Atlántico y el Caribe es un fenómeno natural, a partir de 2011 se ha observado un incremento notable en su abundancia y en la frecuencia de los eventos de arribazón, alcanzando volúmenes excepcionalmente elevados en numerosas zonas costeras del Caribe. La acumulación de grandes cantidades de estos materiales en las playas ha afectado las actividades de toda la población costera del mar Caribe, particularmente aquella que depende de las actividades turísticas (Rodríguez-Martínez et al., 2016), las cuales se ven impactadas no solamente desde el punto de vista estético de los recursos costeros, sino incluso sanitario ya que no conocemos con exactitud la composición y naturaleza de los materiales que se están acumulando en las playas (Langin, 2018) y su efecto a largo plazo sobre la población y los ecosistemas.

El sargazo que está llegando a las playas presenta varias incógnitas relacionadas con las características fisiológicas de los organismos que conforman estas masas. Se ha reportado por diferentes autores que las distintas especies de sargazo tienen capacidades diferentes de fijación de metales pesados y absorción de otros contaminantes (Davis et al., 2003; Fernández et al., 2017; Leyte-Vidal et al., 2019; Marinho-Soriano et al., 2006).

Las masas de sargazo que llegan a las costas del estado de Quintana Roo se componen principalmente de dos especies *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* (Rodríguez-Martínez et al., 2016), acompañadas de otras algas verdes, rojas y pardas que se desarrollan como epífitas sobre las especies principales.

La proporción particular de estas dos especies es variable sin embargo el conocimiento de la afinidad y contenido de diversos metales pesados permitiría con una evaluación de la proporción de estas especies en futuras arribaciones, determinar con un grado aceptable de certidumbre la cantidad y proporción aproximada de los metales pesados contaminantes que estarán recalando en la playa para así, inferir sus efectos tanto en el ecosistema como en la población que habita sitios cercanos a la playa.

Desde el punto de vista de la salud de la población, el sargazo puede ocasionar daños como enfermedades respiratorias, lesiones cardiovasculares y problemas neurológicos principalmente por el ácido sulfhídrico que se desprende al descomponerse de manera anaerobia en las cantidades que se acumulan en las playas (Resiere et al., 2018).

En otros estudios, las concentraciones de metales pesados que se han registrado en estas masas algales son elevadas (Fernández et al., 2017; Rodríguez-Salazar et al., 2024). Dado que una gran cantidad de estas masas de algas son depositadas en las playas por las corrientes locales alineadas a la costa, el proceso de muerte y descomposición de estos organismos libera al ambiente no solo la materia orgánica que los compone, sino también todos los contaminantes que pueden haber absorbido a lo largo de su paso por el océano Atlántico y Mar Caribe. Esta liberación de los contaminantes, en particular los metales pesados absorbidos pueden causar una variedad de efectos perniciosos sobre la salud de la población y los ecosistemas (Volesky & Holan, 1995).

El sargazo que está llegando a las playas, además del efecto visual en el paisaje, puede amenazar especies en peligro como las tortugas marinas (Maurer, A.S. et al., 2015) o causar daños importantes e incluso erradicar las praderas de pastos marinos en la zona costera por la liberación de los metales pesados que se han reportado en elevadas concentraciones en estas algas (Rodríguez-Martínez et al., 2019).

Se asume que las aportaciones de metales pesados a las aguas oceánicas provienen principalmente de polvos del Sahara, aportes de los ríos Congo, Amazonas, Orinoco y escorrentías de la porción norte de Centro y Sudamérica.

Es necesario agregar que los trabajos que reportan esta presencia de metales pesados se han basado en mediciones de ellos en un número relativamente reducido de muestras, lo que muestra como conveniente si no estrictamente necesario llevar más allá el estudio con un número mayor de muestras distribuidas tanto en un espacio mayor, como en un lapso más largo.

El objetivo de este trabajo fue cuantificar el contenido de algunos metales pesados y metaloides en las especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* de las arribazones de algas que recalcan a lo largo de toda la costa de Quintana Roo y por un periodo de al menos dos años consecutivos.

Materiales y Métodos

Se identificaron cuatro etapas metodológicas para alcanzar los objetivos planteados para el estudio:

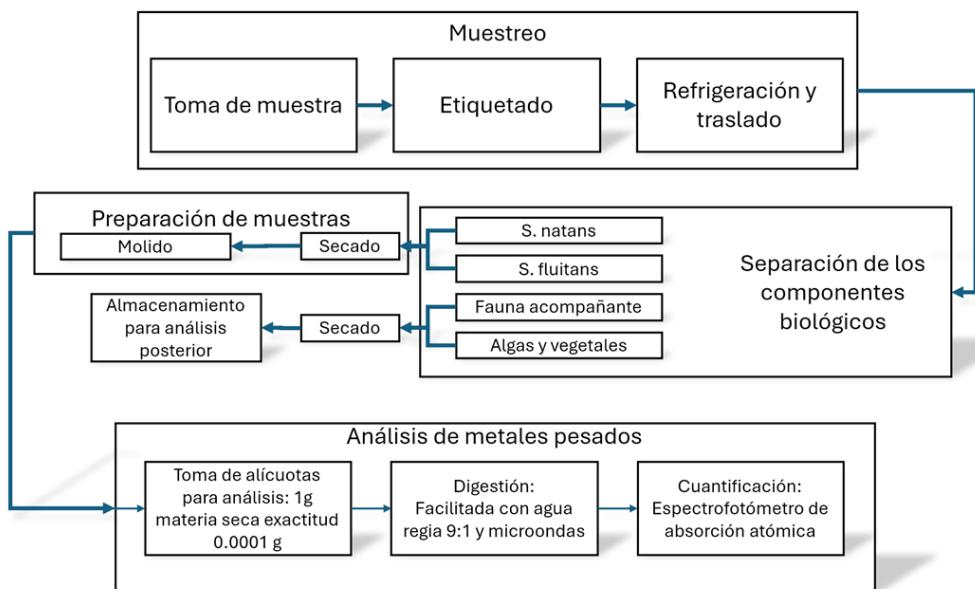


Figura 1 : Diagrama general de los pasos metodológicos seguidos en el presente trabajo

Se tomó en cuenta que las masas flotantes del sargazo que arriban a costas de Quintana Roo están compuestas por dos especies principalmente, *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* las cuales presentan gran cantidad de epibiontes y especies asociadas como briozooarios, crustáceos y juveniles de peces entre otros. Para poder cuantificar los metales pesados que se depositarían en las playas aportados exclusivamente por las dos especies de sargazo identificadas, los diferentes componentes de la comunidad fueron separados para su análisis. La separación llevó a tener muestras separadas de cada una de las dos especies de sargazo, algas asociadas como epibiontes, macrofauna (vertebrados e invertebrados) y meiofauna. Los muestreos se realizaron en cinco campañas a lo largo de dos años tratando de hacer coincidir las fechas de muestreo con el desarrollo de la temporada de arribazones dividida en tercios, es decir, un muestreo inicial poco después del pico máximo de 2019, y los siguientes muestreos con el mismo criterio, los de inicio de temporada para 2020 y 2021 poco antes del pico máximo y los de final de temporada poco después del mismo pico de máximo de arribazones.

Muestreo

Para el diseño del muestreo se tomó en cuenta la necesidad de caracterizar las masas de sargazo que arriban a zonas de la costa que se encuentran cercanas a sitios de importancia turística como primer elemento; subordinados a este elemento se consideraron el comportamiento de la corriente marina del Gran Caribe, las características batimétricas de la costa

en los puntos que rodean estos sitios de interés turístico, las denominadas corrientes alineadas a la costa (de la Lanza-Espino, 2001) así como aspectos de logística involucrados en la toma de muestras y su transporte hasta el laboratorio.

Se consideraron 11 sitios, en la Tabla 1 se muestran los sitios de trabajo, el número de transectos por sitio fue estimado a partir de los datos de la Secretaría de Medio Ambiente de Quintana Roo (SEMA) del volumen de sargazo recogido en las playas cercanas a cada sitio de disposición establecido por la misma SEMA, el número de transectos es proporcional a volumen de sargazo recogido por sitio.

Tabla 1: Zonas de trabajo de recogida en playa por parte de SEMA y número de transectos para cada una de ellas

Sección	Municipio	Localidad	Transectos
1	Othón P. Blanco	Xcalak	2
		Mahahual	3
2	Tulum	Tulum	4
3	Solidaridad	Akumal	1
4	Solidaridad	Puerto aventuras	1
5	Solidaridad	Playacar	2
6	Solidaridad	Playa del Carmen entre muelles	1
7	Solidaridad	Playa del Carmen de muelle Ultramar a Punta Maroma	2
8	Puerto Morelos	Playa la Ceiba a playa Pescadores	3
9	Benito Juárez	Punta Nizuc-Punta Cancún	3
10	Cozumel	de Playa Mezcalito - Playa Rasta	4
11	Isla Mujeres	Isla Mujeres	3
Total			29

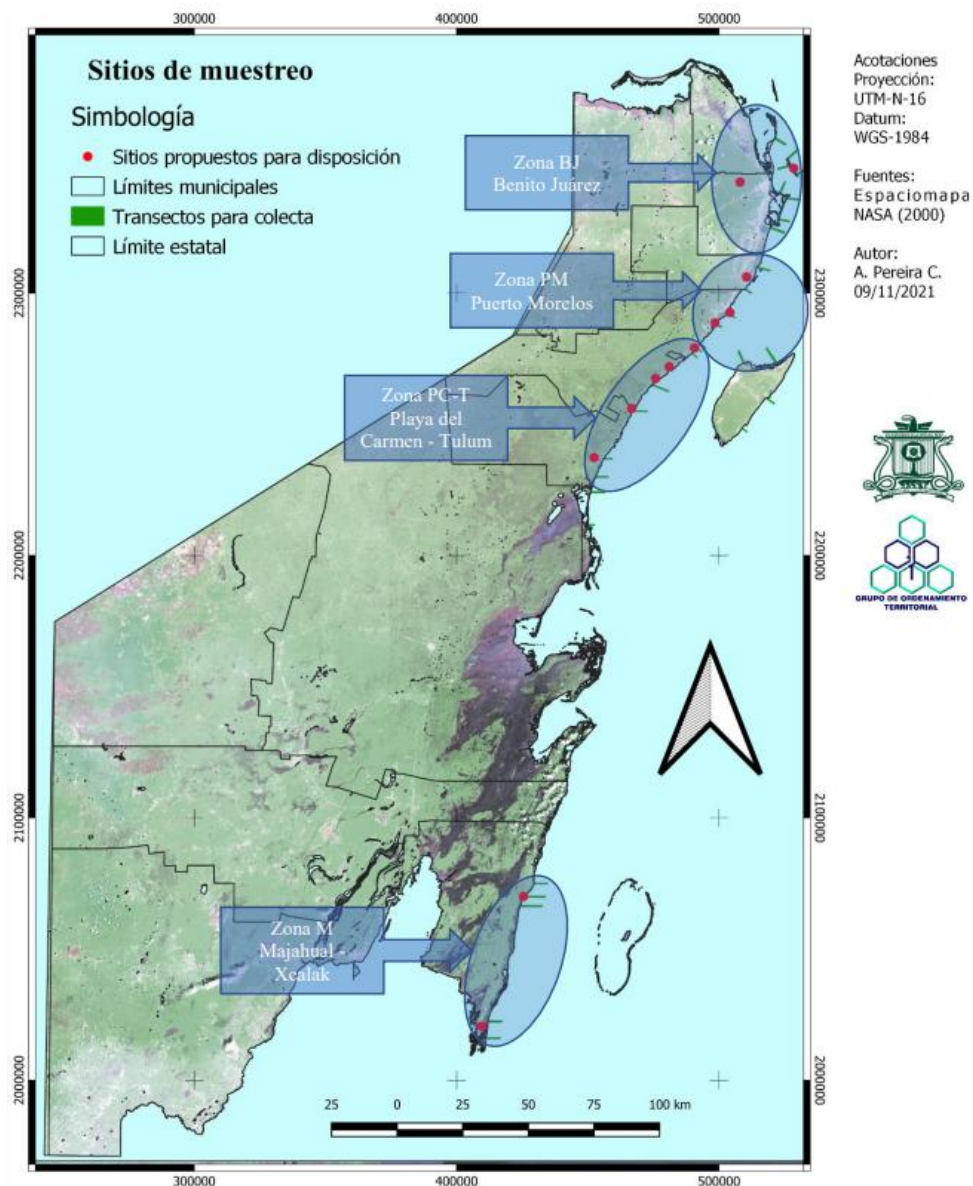


Figura 2: Sitios de muestreo

En la Figura dos se muestran los sitios utilizados por la SEMA para el acopio y disposición del sargazo colectado tanto en mar abierto como en las playas, la ubicación aproximada de los transectos que sirvieron como eje para las zonas de muestreo (**BJ** - Zona Benito Juárez, **PM** - Zona Puerto Morelos, **PC-T** – Zona Playa del Carmen a Tulum y **M** – Zona Majahual a Xcalak), las locaciones representadas son aproximadas, los sitios específicos se vieron influidos por factores como las corrientes, viento, y estado del mar en las fechas en las que se hizo la colecta.

Todas las muestras se tomaron utilizando materiales e implementos libres de metales (solo plástico y madera) para evitar contaminar la muestra con el equipo (Figura 3).



Figura 3: Toma de muestras (Los instrumentos son de madera y plástico, sin componentes metálicos, para evitar contaminación con metales provenientes del equipo usado)

Se tomaron muestras compuestas en cada sitio de colecta, cada una formada por alícuotas colectadas en al menos cinco puntos alrededor de cada transecto en cada sitio e vitando tomar el material de un solo manchón de la masa de algas, de modo que cada muestra es representativa del volumen total del material circundante al punto específico de colecta y no solo de uno de los manchones en el transecto y sitio. Estas muestras son colectadas en mar abierto a distancias de la costa superiores a los 1.5 km. Esto se hizo por triplicado.

De cada muestra compuesta resultante se tomaron cinco kilogramos (5.0 kg) que fueron guardados en una bolsa plástica gruesa procurando eliminar el aire y sellada para ser transportada hasta la costa en obscuridad para evitar alteración de la muestra por efecto de la luz.

Las bolsas fueron etiquetadas usando marcador permanente con la localidad exacta de colecta (coordenadas geográficas con GPS) hora de colecta, estado de la mar y otras observaciones pertinentes. Cada muestra se documentó con al menos una fotografía del sitio de colecta. Las se refrigeraron sumergiéndolas en hielo para ser transportadas al laboratorio para su procesamiento y análisis. Los muestreos en los diferentes sitios se hicieron con la menor diferencia temporal posible (el tiempo necesario para tomar las muestras de cada transecto fue de dos horas aproximadamente, por lo que el muestreo completo tomó en cada caso tres a cuatro días; haciéndose un nuevo muestreo de réplica una semana después asumiendo condiciones

meteorológicas estables) para reducir la variabilidad de los resultados por cambios en la composición del material que arriba.

Una vez en el laboratorio las muestras fueron preparadas en contenedores y sometidos a un proceso de refrigeración a 2 °C para garantizar su conservación hasta el momento de ser procesadas.

Análisis de composición específica

Las muestras fueron separadas manualmente en sus componentes macroscópicos para poder analizar por separado las dos especies de sargazo *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* principalmente, y posteriormente la flora y fauna acompañante.

Para llevar a cabo esta separación se dio capacitación específica al personal para la identificación de estas especies en fresco, se capacitaron cinco profesores y cuatro alumnos de licenciatura.

Como resultado de la separación de estas masas de sargazo en sus especies componentes se obtuvo un total de 808 muestras con sus respectivas réplicas de las dos especies de sargazo.

Preparación de las muestras

La preparación de cada una de las muestras una vez separadas las especies que la forman llevó a cabo en condiciones de baja temperatura para evitar su deterioro. Las submuestras de sargazo y flora y fauna acompañantes fueron pesados en una balanza granataria con precisión de 0.1 gramos previamente al proceso de secado.

Para el secado se usó una corriente de aire frío y seco para reducir al mínimo los cambios en composición. El secado de los materiales tomó alrededor de 180 horas, obteniéndose una masa libre de humedad a temperatura ambiente. Este material fue pesado para obtener el porcentaje de humedad que pierden estos materiales durante su secado al aire en condiciones naturales.

Para verificar que el material estuviera efectivamente seco se procedió a secar varias muestras a diferentes temperaturas (entre los 60° recomendados por las normas oficiales mexicanas para material orgánico con productos termolábiles, hasta los 105° recomendados para fibras y materiales celulósicos como el sargazo y por diferentes tiempos hasta identificar la combinación de tiempo y temperatura a los cuales las muestras alcanzaban un peso constante en la estufa de secado, si necesidad del desecador de sílica. Con esta información se procedió al secado final en una estufa a 70 °C por 24 h. Este material fue nuevamente pesado en una balanza con exactitud de 0.01 gramos, para reportar los resultados de los análisis respecto a biomasa seca.

El material seco obtenido fue desmenuzado mecánicamente hasta partículas de tamaño menor a 0.5 mm con el fin de prepararlo para los análisis posteriores.

Análisis elementales

Las muestras fueron procesadas para determinar la presencia de metales pesados u otros componentes elementales que pudieran representar un riesgo sanitario durante el manejo del material. Las determinaciones incluyeron Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Arsénico (As), Cromo (Cr), Cadmio (Cd) y Níquel (Ni) y en lo posible Fósforo (P) y Boro (B).

La detección y cuantificación de los metales se llevó a cabo en un extracto producido por digestión ácida en 10 ml de agua regia ($\text{HNO}_3\text{-HCl}$) en proporción 9:1 y acelerada en un digestor de microondas MARSX-6 a 160 libras/pulgada de presión y 180°C . La especificación de la marcha fue una rampa de calentamiento de 20 minutos, sostenimiento de 20 minutos y rampa de enfriamiento de 30 minutos.

Posteriormente los digestos fueron diluidos a 50 ml con agua desionizada de conductividad menor a 0.01 microsiemens equivalente a una resistividad de 20-22 Megaohms.

Las determinaciones de contenido de metales se hicieron con un espectrómetro de absorción atómica Thermo-Scientific ICE-3500 con capacidad para técnicas de flama y de horno de grafito con sensibilidad máxima de 0.1 partes por billón usando lámparas de cátodo hueco monoelementales para evitar la interferencia de armónicas entre los elementos.

Resultados

Los resultados obtenidos se presentan por especie, los contenidos de humedad de las muestras colectadas y las concentraciones de metales pesados medidas en cada caso.

Análisis de composición específica

Con la finalidad de obtener la composición global promedio de la masa de sargazo se determinaron las proporciones entre las dos especies de sargazo, tanto en peso húmedo como en peso seco; los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Proporción en peso entre las dos especies de sargazo colectadas

Proporciones	Muestra inicial			Campaña 1			Campaña 2			Campaña 3			Campaña 4		
Datos en gramos	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>	<i>natans</i>	<i>fluitans</i>	<i>fluitans</i> / <i>natans</i>
Húmedo	2030	14828	1:0.14	39545	2938	1:13.46	38901	14393	1:2.70	110000	14840	1:7.41	76662	11645	1:6.58
Seco	419	2758	1:0.15	5885	499	1:11.79	24152	9419	1:2.56	14613	939	1:15.56	14557	2014	1:7.23
Estufa	402	2637	1:0.15	5841	490	1:11.92	23994	9369	1:2.56	14607	931	1:15.69	13714	2007	1:6.83
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo.															

La relación de abundancia entre las dos especies principales es variable y aparentemente depende de la época del año y de las condiciones del tiempo atmosférico entre otros factores ambientales y biológicos, aunque en general se aprecia que hay dominancia de *S. natans* sobre *S. fluitans* en la composición global de las masas comprendiendo entre el 60% y el 95% de la biomasa total. También como puede verse en la misma Tabla 2, hay una mayor abundancia de *S. natans* durante la parte inicial de la temporada de arribazones (campañas 1 y 3) en tanto que va disminuyendo la dominancia hacia el final de la temporada (campañas 2 y 4). La muestra inicial, que fue tomada prácticamente al final de la temporada de arribazones de 2019 muestra valores aun más pequeños en la dominancia de *S. natans* evidenciando el patrón que muestran los dos años posteriores de muestreo.

Preparación

Cada submuestra fue separada con la finalidad de llevar a cabo el resto de los análisis sobre material relativamente homogéneo, separando ambas especies de sargazo, flora y fauna acompañante para su posterior procesamiento.

Se presentan los valores promedio de contenido de humedad con sus respectivas desviaciones estándar en la Tabla 3. *S. natans* tiene un contenido de humedad total ligeramente menor que *S. fluitans* en todas las muestras tomadas para este trabajo. Se debe notar que la variabilidad en cada muestreo se mantiene en valores cercanos en tanto que cambia bastante de un muestreo a otro.

Tabla 3: Análisis de humedad total

			Muestra inicial		Campaña 1		Campaña 2		Campaña 3		Campaña 4		
Humedad			S. <i>natans</i>	S. <i>fluitans</i>	S. <i>natans</i>	S. <i>fluitans</i>	S. <i>natans</i>	S. <i>fluitans</i>	S. <i>natans</i>	S. <i>fluitans</i>	S. <i>natans</i>	S. <i>fluitans</i>	
			n	9	9	30	30	55	55	100	100	70	70
Humedad	Aire	X	79.36%	81.33%	79.77%	80.88%	80.49%	80.84%	86.48%	85.53%	81.22%	80.80%	
		□	0.45%	1.13%	25.14%	27.61%	0.73%	0.04%	9.44%	6.43%	2.98%	18.72%	
	Estufa 70 °C	X	82.65%	85.05%	80.36%	82.24%	81.02%	81.27%	86.51%	86.21%	81.96%	81.05%	
		□	0.12%	1.03%	23.15%	24.10%	1.02%	0.57%	8.96%	6.07%	2.51%	14.25%	
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo													

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo

Análisis elementales

Se cuantificaron los metales pesados y metaloides que han mostrado tener efectos nocivos sobre la salud y que se encuentran en mayores concentraciones en la naturaleza (Maeyouf et al., 2025; Neff, 2002; Zhang et al., 2017), el conjunto de elementos analizados no es exhaustivo, pero representa un aporte significativo para definir inicialmente la inocuidad o toxicidad de este material para diferentes usos.

La Tabla 4 muestra las cantidades promedio de metales pesados y metaloides registradas en el total de muestras colectadas a lo largo de toda la costa de Quintana Roo en cada una de las cinco campañas.

Tabla 4: Contenido promedio de metales pesados y metaloides en S. *natans* y S. *fluitans* total de muestras en todo Quintana Roo. (mg/Kg en biomasa seca)

		Sargassum fluitans					Sargassum natans					Turbinaria sp.
		2019	2020		2021		2019	2020		2021		2021
		Octubre	Mayo	Septiembre	Junio	Septiembre	Octubre	Mayo	Septiembre	Junio	Septiembre	Junio
		Inicial	I	II	III	IV	Inicial	I	II	III	IV	III
	Campaña											
	Muestras	9	35	55	100	70	9	35	55	100	70	100
	N	3	25	52	55	69	3	35	58	100	71	13
Zn mg/kg	X	14.89	10.27	6.64	9.23	3.27	18.07	10.04	7.45	8.05	3.94	26.59
	s	0.79	7.97	6.58	3.14	1.57	7.24	2.81	3.88	3.03	1.69	26.08
Pb mg/kg	X	7.7367	30.00	14.90	1.19	0.95	7.96	24.25	15.07	0.69	2.34	DLD
	s	7.03	33.87	27.62	0.82	0.69	5.35	10.25	13.85	1.31	4.49	DLD
B mg/kg	X	37.95	271.52	247.04			64.43	192.09	182.68			

	s	27.91	149.70	264.89			10.96	87.90	92.20		
P mg/kg	X	1904.76	1305.76	1298.73	1752.02		1172.05	1478.04	1073.13	1305.62	15842.60
	s	451.38	471.46	438.16	1151.10		428.57	468.65	454.66	925.92	25271.93
Ni mg/kg	X	134.52	13.84	12.42	16.10	11.90	204.19	12.50	11.29	13.96	163.06
	s	141.02	9.70	6.96	12.03	1.85	151.34	3.63	3.21	16.37	185.57
Mn mg/kg	X	14.99	26.93	28.49	22.94	30.31	17.37	33.56	32.52	16.79	39.67
	s	1.20	7.27	5.46	10.69	5.90	3.78	8.91	7.32	5.99	35.35
Cu mg/kg	X	1.16	8.09	6.08	7.62	3.87	3.81	8.23	6.77	6.38	82.54
	s	1.65	10.59	7.62	7.85	0.84	2.30	2.95	2.95	3.72	93.43
Cr mg/kg	X	2.26	46.22	23.27	4.87	2.52	1.86	37.23	23.04	3.82	62.36
	s	0.80	44.04	37.70	3.66	2.08	1.01	12.85	20.15	3.42	76.74
Cd mg/kg	X	1.17	4.39	2.84	1.35	1.48	1.25	3.86	2.96	1.22	12.95
	s	0.49	3.87	3.07	0.62	0.24	0.14	1.15	1.44	0.31	15.89
As mg/kg	X	222.38	809.41	454.31	186.00	138.64	183.05	697.79	471.38	141.67	2191.41
	s	59.65	265.67	587.23	197.51	85.22	14.26	168.52	315.10	56.33	2534.19
Nota: DLD= Debajo del Límite de Detección de la técnica empleada. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo											

Hay una mayor variabilidad en contenido de metales pesados entre campañas comparada con la variabilidad de las muestras de una misma campaña, lo primero se evidencia por los valores promedio de cada elemento en las distintas campañas a lo largo de dos años y medio y la variabilidad intramuestral evidenciada por la desviación estándar para cada caso.

En las Tablas 5a y 5b se reportan los contenidos de metales pesados y metaloides por campaña y zona de muestreo para *S. fluitans* y *S. natans* (5a y 5b respectivamente), se identifica el mismo patrón descrito a partir de la Tabla 4, manifestando gran variabilidad de una campaña a otra y una escasa variabilidad dentro de la misma campaña o entre sitios para todos los elementos cuantificados.

Tabla 5ª: Contenido promedio de metales pesados y metaloides en *S. fluitans* por campaña y por zona de muestreo. Total de muestras en todo Quintana Roo. (mg/Kg en biomasa seca)

Sargassum fluitans																					
Campana Muestras		2019	2020										2021								
		Octubre	Mayo					Septiembre					Junio					Septiembre			
		Inicial	I				II					III					IV				
		9	35				55					100					70				
N	3	25	10	10	6	52	9	10	5	28	55	23	12	6	14	69	20	15	9	25	
Zona	PM	Estado	BJ	PM	PC-T	Estado	BJ	PM	PC-T	M	Estado	BJ	PM	PC-T	M	Estado	BJ	PM	PC-T	M	
Zn mg/kg	X	14.9	10.3	9.3	7.5	16.3	6.6	9.3	7.5	10.4	4.8	9.2	10.3	7.6	9.5	8.7	3.3	4.6	2.3	2.1	3.2
	s	0.8	8.0	4.3	2.8	13.2	6.6	4.3	2.8	1.2	7.9	3.1	2.0	0.9	2.2	5.0	1.6	1.9	0.4	0.5	1.1
Pb mg/kg	X	7.7	30.0	26.8	17.3	55.9	14.9	26.8	17.3	31.4	7.3	1.2	1.1	1.5	0.9	1.2	1.0	1.2	1.1	0.8	0.6
	s	7.0	33.9	19.4	10.5	55.4	27.6	19.4	10.5	7.7	33.0	0.8	0.7	0.7	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.4	0.4
B mg/kg	X	38.0	271.5	229.0	147.7	541.7	247.0	229.0	147.7	288.3	281.0										
	s	27.9	149.7	204.5	52.3	575.6	264.9	204.5	52.3	111.0	329.6										
P mg/kg	X	1904.8	1305.8	1584.3	1297.5	1511.2	1298.7	1634.2	1095.6	1342.0	1247.5	1752.0	1333.3	1871.8	2223.8	2135.1					
	s	451.4	471.5	354.2	436.1	247.7	438.2	297.1	415.7	341.1	523.5	1151.1	653.5	907.2	725.4	1740.8					
Ni mg/kg	X	134.5	13.8	14.0	9.8	20.3	12.4	14.0	9.8	13.5	12.6	16.1	13.9	14.5	14.8	21.6	11.9	11.3	13.5	12.7	11.1
	s	141.0	9.7	7.1	3.0	15.3	7.0	7.1	3.0	1.5	8.2	12.0	1.5	3.4	7.1	22.2	1.9	1.7	1.4	0.5	1.7
Mn mg/kg	X	15.0	26.9	23.9	28.4	29.1	28.5	23.9	28.4	24.9	30.7	22.9	20.3	20.3	21.8	30.1	30.3	25.6	34.4	34.7	30.1
	s	1.2	7.3	4.7	5.6	10.6	5.5	4.7	5.6	5.2	4.3	10.7	2.1	4.6	4.6	18.6	5.9	7.8	3.5	1.8	2.0
Cu mg/kg	X	1.2	8.1	6.6	5.9	16.6	6.1	6.6	4.3	9.2	6.0	7.6	7.6	6.0	6.2	9.7	3.9	4.2	3.6	2.8	4.2
	s	1.7	10.6	3.4	4.4	16.7	7.6	3.4	6.5	2.3	9.2	7.9	9.2	2.0	1.9	9.6	0.8	0.8	0.5	0.5	0.8
Cr mg/kg	X	2.3	46.2	43.4	30.0	77.4	23.3	43.4	30.0	45.8	10.3	4.9	3.6	4.3	4.8	7.2	2.5	3.1	2.7	2.4	2.0
	s	0.8	44.0	30.8	10.7	71.1	37.7	30.8	10.7	8.9	43.3	3.7	0.8	1.4	2.5	6.2	2.1	3.5	0.5	0.4	1.2
Cd mg/kg	X	1.2	4.4	4.1	3.1	7.0	2.8	4.1	3.1	4.2	2.1	1.4	1.1	1.4	1.3	1.7	1.5	1.4	1.7	1.6	1.4
	s	0.5	3.9	2.4	1.1	6.4	3.1	2.4	1.1	0.7	3.7	0.6	0.2	0.5	0.7	0.9	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
As mg/kg	X	222.4	809.4	664.1	632.5	1322.3	454.3	664.1	632.5	810.6	259.6	186.0	162.0	167.3	172.0	247.5	138.6	100.7	200.9	188.9	113.6
	s	59.7	265.7	375.2	135.5	1153.9	587.2	375.2	135.5	163.4	705.5	197.5	52.7	52.4	79.3	372.2	85.2	73.3	48.7	48.7	91.9
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo																					

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo

Tabla 5b: Contenido promedio de metales pesados y metaloides en *S. natans* por campaña y por zona de muestreo. Total de muestras en todo Quintana Roo. (mg/Kg en biomasa seca)

		Sargassum natans																				
		2019	2020										2021									
		Octubre	Mayo					Septiembre					Junio					Septiembre				
		Inicial	I					II					III					IV				
		9	35					55					100					70				
Campana Muestras		N	3	35	9	10	16	58	9	10	15	24	100	31	20	15	34	71	22	15	10	24
Zona		PM	Estado	BJ	PM	PC-T	Estado	BJ	PM	PC-T	M	Estado	BJ	PM	PC-T	M	Estado	BJ	PM	PC-T	M	
Zn mg/kg	X	18.1	10.0	9.1	8.3	11.6	7.5	9.1	8.3	12.2	3.5	8.0	9.6	7.6	9.8	6.1	3.9	4.8	3.8	3.4	3.5	
	s	7.2	2.8	1.4	1.9	3.1	3.9	1.4	1.9	2.3	0.4	3.0	2.2	4.5	1.9	1.3	1.7	2.4	1.3	1.5	0.4	
Pb mg/kg	X	8.0	24.2	21.5	16.8	30.4	15.1	21.5	16.8	32.2	1.3	0.7	1.1	0.7	0.7	0.8	2.3	3.2	0.9	4.3	0.9	
	s	5.4	10.2	5.7	8.1	9.6	13.8	5.7	8.1	7.2	1.1	1.3	0.8	0.6	0.4	0.7	4.5	4.1	0.7	7.6	1.0	
B mg/kg	X	64.4	192.1	166.4	104.7	261.2	182.7	166.4	104.7	272.3	165.3											
	s	11.0	87.9	31.7	31.9	76.1	92.2	31.7	31.9	64.7	95.8											
P mg/kg	X	1172.1	1478.0	1567.2	1386.2	1511.0	1073.1	1395.2	954.8	1145.4	1068.3	1305.6	1359.3	1312.6	1183.6	1306.4						
	s	428.6	468.7	309.5	402.7	436.0	454.7	254.7	214.8	357.6	402.2	925.9	638.9	1720.7	635.3	469.5						
Ni mg/kg	X	204.2	12.5	13.1	9.5	14.0	11.3	13.1	9.5	14.7	9.2	14.0	12.4	20.6	12.1	12.3	10.0	10.6	10.2	9.7	9.4	
	s	151.3	3.6	2.3	2.5	3.7	3.2	2.3	2.5	2.8	1.2	16.4	0.9	35.8	1.0	1.0	2.5	3.7	2.2	1.6	0.5	
Mn mg/kg	X	17.4	33.6	30.6	36.6	33.3	32.5	30.6	36.6	34.2	30.5	16.8	17.7	13.0	15.5	18.8	30.3	26.9	33.3	34.2	29.8	
	s	3.8	8.9	6.0	10.3	8.8	7.3	6.0	10.3	8.3	3.8	6.0	5.6	5.8	4.0	6.0	7.3	10.1	6.9	3.5	3.0	
Cu mg/kg	X	3.8	8.2	7.9	6.5	9.5	6.8	7.9	6.5	10.0	4.5	6.4	5.7	7.9	6.2	6.2	5.0	4.8	6.1	5.1	4.5	
	s	2.3	3.0	1.4	3.5	2.6	2.9	1.4	3.5	1.9	0.8	3.7	0.9	7.9	0.6	1.0	1.3	1.4	1.2	1.3	0.7	
Cr mg/kg	X	1.9	37.2	37.2	27.2	43.5	23.0	37.2	27.2	45.4	2.1	3.8	3.6	5.1	3.9	3.2	2.0	2.3	2.2	2.1	1.6	
	s	1.0	12.8	9.3	9.8	12.3	20.2	9.3	9.8	10.3	3.0	3.4	0.9	7.0	2.4	0.9	0.8	0.6	0.3	0.3	1.0	
Cd mg/kg	X	1.3	3.9	3.9	3.0	4.4	3.0	3.9	3.0	4.6	1.6	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.8	1.9	1.9	1.9	1.6	
	s	0.1	1.1	0.9	0.8	1.1	1.4	0.9	0.8	0.9	0.3	0.3	0.2	0.5	0.2	0.3	0.4	0.4	0.1	0.3	0.3	
As mg/kg	X	183.1	697.8	608.7	611.7	801.7	471.4	608.7	611.7	816.8	145.5	141.7	137.8	183.2	138.7	122.2	175.1	183.7	213.6	194.5	135.2	
	s	14.3	168.5	153.0	114.4	144.5	315.1	153.0	114.4	136.4	134.3	56.3	40.9	90.6	41.6	28.4	86.5	93.8	17.3	59.0	98.4	
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo																						

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo

Al comparar *S. fluitans* (Tabla 5a) y *S. natans* (Tabla 5b), se observa una diferencia en las cantidades de metales pesados medidas, *S. fluitans* muestra en casi todos los sitios y todas las campañas una concentración mayor de arsénico que la exhibida por *S. natans*, lo mismo se puede observar para plomo y cromo. Los datos muestran mayor concentración de metales pesados en 2020 y una disminución en las concentraciones para 2021.

Discusión Generales

Se trata de un fenómeno con gran variabilidad en la distribución espacial y temporal de las masas de sargazo que derivan con la corriente del Mar Caribe y las aguas alineadas a la costa (de la Lanza-Espino, 2001), así como las características de la carga de metales pesados de estas poblaciones de sargazo.

La composición de las masas de sargazo por su variabilidad en la composición por especies hace que la masa general de sargazo se deba entender como heterogénea, tanto en la proporción de las especies que la componen como en los aspectos ligados a las diferencias que se han encontrado entre ambas especies en cuanto a contenido de metales pesados.

A continuación, se muestran gráficos que comparan la concentración de metales pesados en ambas especies de sargazo, las gráficas muestran las concentraciones ordenadas por fechas y con las mismas escalas, dado que las muestras de ambas especies fueron obtenidas de la misma masa algal en mar abierto, las diferencias no pueden ser atribuidas a condiciones ambientales, sino a diferencias entre las especies.

Metales pesados

En la Figura 4 se presentan los comportamientos que ha sido posible detectar en las concentraciones de P, As y B, en ambas especies, se observan concentraciones mayores de P en *S. fluitans* comparado con *S. natans* para 2021 lo cual puede estar relacionado con capacidades diferenciadas entre estas dos especies para la absorción de fósforo. El incremento en los niveles de fósforo total en las masas de sargazo puede estar asociado a aportes terrígenos.



Figura 4: Contenido de Fósforo, Boro y Arsénico por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*.

En 2021 se observa que los contenidos de arsénico tienden a disminuir, lo que puede indicar una menor disponibilidad de este elemento al interior de la cuenca del Mar Caribe. *S. fluitans* muestra una variación y un incremento mayor que el exhibido por *S. Natans*.

El arsénico es un elemento de concentración relativamente baja en aguas oceánicas superficiales (Szubska & Bełdowski, 2023; Wang et al., 2023) pero con uso frecuente en la minería y en otras actividades industriales, lo que asociaría la presencia en cantidades elevadas a los aportes terrígenos,

en particular en una cuenca cerrada como el Mar Caribe (Szubska & Beldowski, 2023), o una zona con fuerte influencia de estos aportes como sería la parte intertropical occidental del Océano Atlántico (ríos Orinoco y Amazonas).

En la Figura 5 se presenta la comparación entre *S. fluitans* y *S. natans* para varios metales pesados de interés, como se puede observar de las gráficas, el zinc, manganeso y plomo siguen un comportamiento similar al expuesto para el fósforo (la Figura 2), correspondiendo a aportaciones terrígenas a lo largo de toda la parte continental de la cuenca del Mar Caribe.

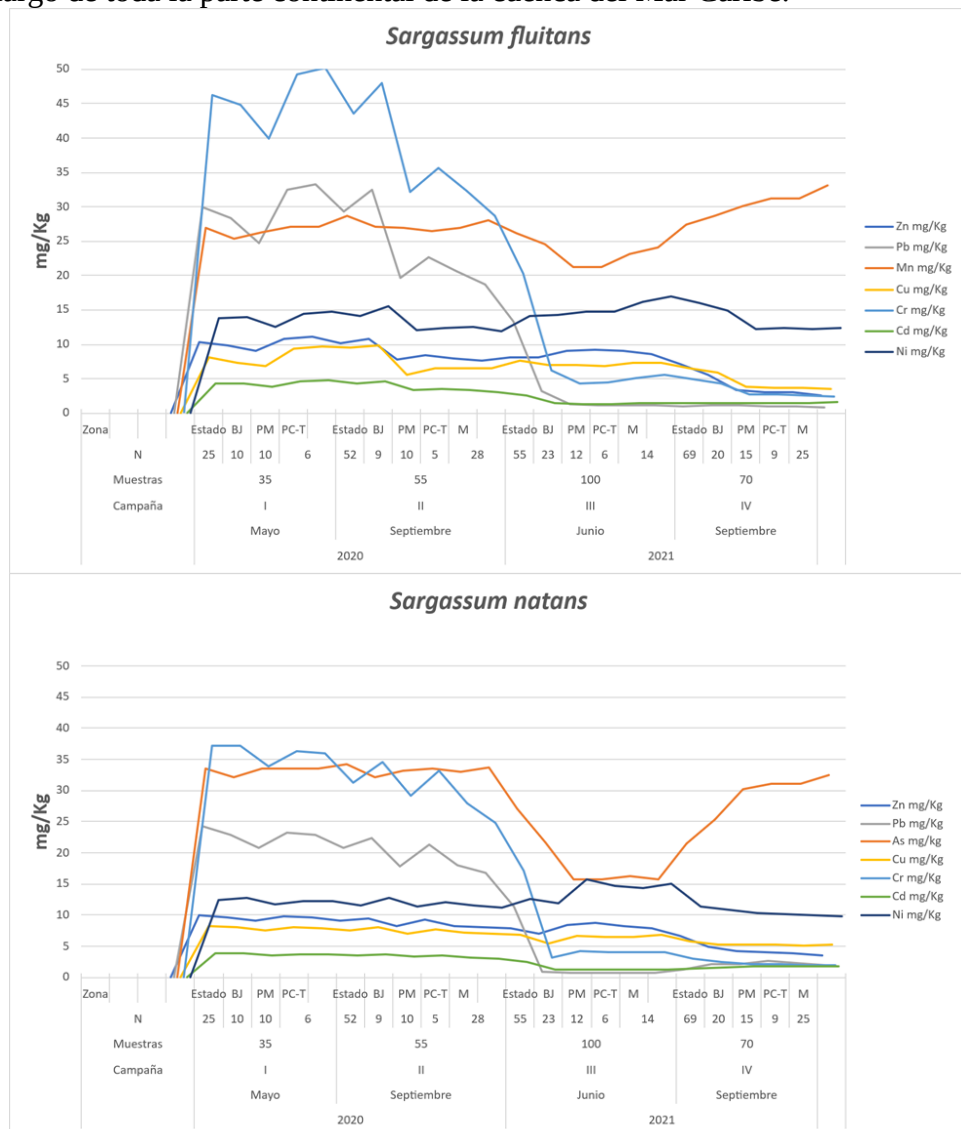


Figura 5: Contenido de Zinc, Plomo, Manganeso, Cobre, Cromo, Cadmio y Níquel por campaña y sitio para *S. fluitans* y *S. natans*

Como el arsénico, los otros metales, cromo, cadmio y níquel tienen un comportamiento relativamente homogéneo que indica que no hay un aporte significativo de estos materiales durante el periodo de desarrollo de las poblaciones de sargazo al interior de la cuenca del Mar Caribe.

Es de particular interés hacer notar que el incremento en los niveles de manganeso durante la segunda parte de 2021 se puede asociar con la temporada de lluvias en la zona de Centroamérica, como aporte terrígeno ya que se encuentra asociado al arrastre de materiales de los suelos que limitan la cuenca, siendo su concentración baja en las aguas oceánicas superficiales más oxigenadas (Neff, 2002; Pinto & Rivera, 2006; Szubska & Beldowski, 2023).

El cromo es un elemento con una mayor movilidad ambiental (Jiménez Verdesoto, 2012), algunas de sus formas movilizables son particularmente tóxicas y esa misma variabilidad en su comportamiento lo hace un elemento más permanente en el sistema en formas movilizables y por tanto contaminantes que pueden ser reabsorbidos desde la columna de agua conforme el sargazo se descompone.

En la misma Figura 4 se puede apreciar claramente que hay diferencias en el comportamiento de ambas especies en cuanto a la absorción de diferentes metales.

De los resultados presentados destaca particularmente el contenido de fósforo el cual para ambas especies excede los 200 mg por kilogramo de biomasa húmeda, resultan también llamativos los contenidos de arsénico, cromo, níquel y plomo, los cuales corroboran los reportes existentes sobre la tendencia de estas especies de algas a la fijación de metales pesados y metaloides (Piña, J.J. et al., 2010).

El presente trabajo presenta los resultados de dos años y medio de muestreos y los resultados del análisis de más de 800 muestras, la variabilidad del comportamiento del fenómeno a lo largo del tiempo sugiere la necesidad de mantener un monitoreo permanente de la cantidad y la calidad del sargazo que arriba a las costas de Quintana Roo en cuanto a su contenido de metales pesados.

En la Tabla 6 se presentan los diferentes valores límite para algunos elementos de acuerdo con las NOM, destacando la mayor cantidad de información para los cuatro elementos mencionados.

La comparación de los contenidos de metales pesados a lo largo del tiempo y en diferentes localidades permite establecer criterios de manejo para un material que tiene concentraciones altas de metales pesados como arsénico, plomo, cromo y cadmio (Tabla 6).

Tabla 6: Comparación de los contenidos de metales pesados y metaloides respecto a los límites máximos permitidos por diferentes normas oficiales mexicanas

Base Húmeda		Elemento																		Observaciones		
Referencia		Cu (mg/kg)		Mn (mg/kg)		P (mg/kg)		B (mg/kg)		Pb (mg/kg)		Zn (mg/kg)		As (mg/kg)		Cr (mg/kg)		Cd (mg/kg)			Ni (mg/kg)	
NOM	127-SSA2	2.00		0.15		ND		ND		0.01		5.00		0.03		0.05		0.01		ND		Agua potable
NOM	130-SSA1	5.00		ND		ND		ND		1.00		5.00		1.00		ND		0.20		ND		Alimentos envasados herméticos
NOM	131-SSA1	ND		ND		ND		ND		0.20		ND		0.10		ND		ND		ND		Fórmulas para lactantes
NOM	201-SSA1	1.00		0.40		ND		ND		0.01		ND		0.01		0.05		0.00		0.02		Agua embotellada y hielo para consumo
NOM	213-SSA1	ND		ND		ND		ND		1.00		ND		0.50		ND		0.10		ND		Cárnicos procesados
NOM	242-SSA2	ND		ND		ND		ND		1.00		ND		80.00		ND		2.00		ND		Productos pesqueros
NOM	247-SSA1	ND		ND		ND		ND		0.50		40.00		ND		ND		0.10		ND		Harinas y cereales
NOM	001-SEMARNAT	D 4.0	M 6.0	D ND	M ND	D ND	M ND	D ND	M ND	D 0.5	M 1.0	D 10	M 20	D 0.2	M 0.4	D 1.0	M 1.5	D 0.2	M 0.4	D 2.0	M 4.0	Aguas residuales en aguas costeras para recreación promedio (D=diario; M=mensual)
S. natans	X	0.7		3.4		248.2		12.6		1.4		3.6		36.9		0.3		0.2		40.7		Muestra inicial Octubre de 2019
	□	0.5		0.7		90.1		2.2		1.0		1.5		2.9		0.2		0.1		29.8		
S. fluitans	X	0.2		2.7		300.6		7.5		1.4		2.8		44.1		0.5		0.2		28.8		
	□	0.3		0.2		90.7		5.1		1.4		0.2		11.3		0.2		0.1		28.6		
S. natans	X	8.2		33.6		1478.0		192.1		24.2		10.0		697.8		37.2		3.9		12.5		Campaña I Mayo de 2020
	□	3.0		8.9		468.7		87.9		10.2		2.8		168.5		12.8		1.1		3.6		
S. fluitans	X	8.1		26.9		1305.8		271.5		30.0		10.3		809.4		46.2		4.4		13.8		
	□	10.6		7.3		471.5		149.7		33.9		8.0		265.7		44.0		3.9		9.7		
S. natans	X	6.8		32.5		1073.1		182.7		15.1		7.5		471.4		23.0		3.0		11.3		Campaña II Septiembre de 2020
	□	2.9		7.3		454.7		92.2		13.8		3.9		315.1		20.2		1.4		3.2		
S. fluitans	X	6.1		28.5		1298.7		247.0		14.9		6.6		454.3		23.3		2.8		12.4		
	□	7.6		5.5		438.2		264.9		27.6		6.6		587.2		37.7		3.1		7.0		
S. natans	X	6.4		16.8		1305.6		ND		0.7		8.0		141.7		3.8		1.2		14.0		Campaña III Junio de 2021
	□	3.7		6.0		925.9		ND		1.3		3.0		56.3		3.4		0.3		16.4		
S. fluitans	X	7.6		22.9		1752.0		ND		1.2		9.2		186.0		4.9		1.4		16.1		
	□	7.9		10.7		1151.1		ND		0.8		3.1		197.5		3.7		0.6		12.0		
S. natans	X	5.0		30.3		ND		ND		2.3		3.9		175.1		2.0		1.8		10.0		Campaña IV Septiembre de 2021
	□	1.3		7.3		ND		ND		4.5		1.7		86.5		0.8		0.4		2.5		
S. fluitans	X	3.9		30.3		ND		ND		1.0		3.3		138.6		2.5		1.5		11.9		
	□	0.8		5.9		ND		ND		0.7		1.6		85.2		2.1		0.2		1.9		
ND= No Data. Digestión con agua regia N:Cl 9:1 9:1ml, Microondas 600W 20'-20'-30', 160 PSI, 180°C								Nota: Los datos específicos empleados en esta Tabla son promedios. El mismo análisis da resultados semejantes con los valores de cualquiera de las fechas consideradas en el trabajo o con los valores promedio de todo el periodo. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en este trabajo														

La presencia de estos metales pesados, aún en las concentraciones registradas, no descalifican el uso de este sargazo para diferentes aplicaciones, sin embargo, debe tenerse en mente que los procesos a que se someta el material deberán garantizar la reducción de la concentración de estos metales a niveles adecuados para el uso a que se destine. En particular casos en los que el uso propuesto involucra alimentación de personas o animales destinados al consumo humano, productos farmacéuticos para ingesta o contacto, o algunos otros usos semejantes y no descarta su utilización en la elaboración de productos que no entran en contacto con la población o los animales destinados al consumo como podría ser la elaboración de papel, cartón y otros derivados semejantes.

Considerando la Tabla 6 es posible decir que el contenido de metales pesados en la muestras procesadas es alto aún en los casos de las concentraciones más bajas registradas, por lo que debe considerarse esta carga de metales tóxicos para cualquier aplicación que se le desee dar.

Lo anterior no impide su uso para aplicaciones o productos fuera de las mencionadas como podría ser la extracción de celulosas para elaboración de papel y otros derivados.

Dados los resultados y considerandos expuestos, la recomendación va en dirección a una profundización y sistematización de la investigación sobre las características de estas especies de sargazo desde los puntos de vista nutricional, farmacéutico, como bioconcentrador de contaminantes, etc. así como a la elaboración de métodos de prueba para su análisis y en su momento, normas oficiales para la colecta, manejo, control, aprovechamiento y disposición del sargazo pelágico.

Finalmente, es evidente de estos resultados que es necesario llevar a cabo estudios más extensos, profundos y exhaustivos tomando en cuenta la naturaleza de los materiales que conforman estas arribazones de sargazo en particular las dos especies que forman hasta el 95% de la biomasa total en ellas.

Conclusiones

Las arribazones masivas de sargazo a la cuenca del Mar Caribe y sus playas son un fenómeno cuya variabilidad es muy grande en términos de la distribución espacial y temporal de las masas de sargazo que derivan con la corriente del Mar Caribe y aguas alineadas a la costa, así como las características de la carga de metales pesados de estas poblaciones de sargazo. *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* manifiestan diferencias tanto en su dominancia relativa en las comunidades de algas que arriban con la corriente del Mar Caribe como en su composición proximal y contenido de metales pesados.

La variabilidad en la composición por especies hace que la masa general de sargazo se deba entender como heterogénea, tanto en la proporción de las especies que la componen como en el contenido de metales pesados.

Sargassum fluitans y *Sargassum natans* manifiestan diferencias en cuanto a la capacidad para absorber y retener diferentes metales pesados lo que hace que ambas especies sean diferentes y por tanto la carga de metales pesados que arriba a las costas de Quintana Roo en estas algas dependerá de la proporción entre estas especies en cada manchón en particular, haciendo de estas poblaciones comunidades heterogéneas en su composición y por tanto en su potencial toxicidad por la carga de metales pesados.

El contenido de metales pesados en las muestras procesadas es alto, aún en los casos de las concentraciones más bajas registradas y permite hacer la recomendación de no usar este material o sus derivados en productos para consumo humano, consumo de animales criados para consumo humano o en productos que deban entrar en contacto externo con la piel por tiempos prolongados sin un tratamiento o método de producción que garantice la disminución de concentraciones de estos metales a niveles compatibles con la salud.

Se debe tomar en cuenta que para cualquier uso potencial se deberán elaborar los estudios de inocuidad necesarios para garantizar el uso seguro de los productos derivados del sargazo que arriba a las costas de Quintana Roo. Dados los resultados y considerandos antes expuestos, la más importante de las recomendaciones debe ir en dirección a una profundización y sistematización de la investigación sobre las características de estas especies de sargazo desde los puntos de vista nutricional, farmacéutico, como bioconcentrador de contaminantes, etc. así como a la elaboración de métodos de prueba para su análisis y en su momento, normas oficiales para la colecta, manejo, control, aprovechamiento y disposición del sargazo pelágico que arriba a las costas de Quintana Roo.

Agradecimientos

Extendemos nuestro agradecimiento al M. en C. Víctor Manuel Alcérreca Sánchez por su apoyo en la discusión de algunos de los resultados obtenidos, así como por sus valiosas observaciones durante el desarrollo del proyecto y la preparación del manuscrito.

Conflicto de intereses: Los autores no declararon ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de los datos: Todos los datos están incluidos en el contenido del artículo.

Declaración de financiación: Este trabajo fue financiado por el Consejo Quintanarroense de Ciencia, Tecnología e Innovación al amparo del convenio número: CEC-CHET-44-2019.

References:

1. Davis, T. A., Llanes, F., Volesky, B., & Mucci, A. (2003). Metal selectivity of *Sargassum* spp. And their alginates in relation to their α -L-guluronic acid content and conformation. *Environmental Science & Technology*, 37(2), 261–267. <https://doi.org/10/bzz9x3>
2. de la Lanza-Espino, G. (2001). *Características físico-químicas de los mares de México* (Vol. 1). Plaza y Valdes.
3. Fernández, F., Boluda, C. J., Olivera, J., Guillermo, L. A., Gómez, B., Echavarría, E., & Mendis Gómez, A. (2017). Análisis Elemental Prospectivo de la Biomasa algal acumulada en las costas de la República Dominicana durante 2015. *Centro Azúcar*, 44(1), 11–22.
4. Jiménez Verdesoto, D. B. (2012). *Cuantificación de metales pesados (Cadmio, Cromo, Níquel y Plomo) en agua superficial, sedimentos y organismos (Crassostrea columbiensis) Ostión de Mangle en el Puente Portete el Estero Salado Guayaquil*. [B.S. thesis].
5. Langin, K. (2018). Seaweed masses assault Caribbean islands. *Science*, 360(6394), 1157–1158. <https://doi.org/10.1126/science.360.6394.1157>
6. Leyte-Vidal, J. J. P., González-Fernández, E. L. A., Gutiérrez-Artiles, L. O., Márquez-Llauger, L., & Cristo, L. T. A.-D. (2019). *Caracterización de tres bioindicadores de contaminación por metales pesados*. 17.
7. Maeyouf, H., Khattab, R. A., Temraz, T., Sami, M., Ali, I., & Imanova, G. (2025). Heavy metal contamination in seawater, sediments, algae, and fish from Susah and Tobruk, Mediterranean Sea. *Water Environment Research*, 97(5), e70091. <https://doi.org/10.1002/wer.70091>
8. Marinho-Soriano, E., Fonseca, P. C., Carneiro, M. A. A., & Moreira, W. S. C. (2006). Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds. *Bioresource Technology*, 97(18), 2402–2406. <https://doi.org/10/cpn7jf>
9. Maurer, A.S., Neef, E.De, & Stapleton, S. (2015). *Sargassum* accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. *Front. Ecol. Environ.*, 13, 394–395.
10. Neff, J. (2002). *Arsenic in the Ocean* (pp. 57–78). <https://doi.org/10.1016/B978-008043716-3/50004-X>

11. Pinto, L., & Rivera, C. (2006). *Distribución de hierro y manganeso reducido en aguas intersticiales entre Boca del Guafo (44° s) y Golfo Elefantes (46,5° s), Chile austral*. 29.
12. Resiere, D., Valentino, R., Nevière, R., Banydeen, R., Gueye, P., Florentin, J., Cabié, A., Lebrun, T., Mégarbane, B., Guerrier, G., & Mehdaoui, H. (2018). Sargassum seaweed on Caribbean islands: An international public health concern. *The Lancet*, 392(10165), 2691. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32777-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32777-6)
13. Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V., & García-Rivas, M. C. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic Sargassum. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 201–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>
14. Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B., & Jordán-Dahlgren, E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014–2015). *FloreCIMIENTOS Algales Nocivos En México. Ensenada: CICESE*, 352.
15. 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. (2024). *Sargazo: Distribución espacial y análisis elemental*. https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/18549/mod_resource/content/1/Exposici%C3%B3n%20Sargazo-CIACVI%202024.pdf
16. Szubska, M., & Bełdowski, J. (2023). Spatial distribution of arsenic in surface sediments of the southern Baltic Sea. *Oceanologia*, 65(2), 423–433. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.12.002>
17. Volesky, B., & Holan, Z. R. (1995). Biosorption of Heavy Metals. *Biotechnology Progress*, 11(3), 235–250. <https://doi.org/10.1021/bp00033a001>
18. Wang, N., Ye, Z., Huang, L., Zhang, C., Guo, Y., & Zhang, W. (2023). Arsenic Occurrence and Cycling in the Aquatic Environment: A Comparison between Freshwater and Seawater. *Water*, 15(1), 147. <https://doi.org/10.3390/w15010147>
19. Zhang, A., Wang, L., Zhao, S., Yang, X., Zhao, Q., Zhang, X., & Yuan, X. (2017). Heavy metals in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay of China: Levels, distribution and potential risks. *Regional Studies in Marine Science*, 11, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.02.002>

Normas nacionales e internacionales de referencia para los análisis y los valores de referencia de metales pesados:

1. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
2. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
3. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
4. Norma Oficial Mexicana NOM-130-SSA1-1995, Bienes y servicios. Alimentos envasados en recipientes de cierre hermético y sometidos a tratamiento térmico. Disposiciones y especificaciones sanitarias.
5. Norma Oficial Mexicana NOM-131-SSA1-2012, Productos y servicios. Fórmulas para lactantes, de continuación y para necesidades especiales de nutrición. Alimentos y bebidas no alcohólicas para lactantes y niños de corta edad. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Etiquetado y métodos de prueba
6. Norma Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2015, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias.
7. Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-213-SSA1-2000, Productos y servicios. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.
8. Norma Oficial Mexicana NOM 213-SSA1-2019, Productos y servicios. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias. Métodos de prueba.
9. Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009, Productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba.
10. Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba.
11. Official Methods of Analysis of AOAC International (2016) 19th Ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 934.01

12. Official Methods of Analysis of AOAC International (2016) 19th Ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 942.05
13. Official Methods of Analysis of AOAC International (2016) 19th Ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 960.52
14. Official Methods of Analysis of AOAC International (2016) 19th Ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 920.39
15. Official Methods of Analysis of AOAC International (2016) 19th Ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, Official Method 2011.14
16. Official Methods of Analysis of AOAC International (2008) 13th Ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, USA, APPROVED PROCEDURE ba 6a-05