

## Indicadores ultraestructurales, elementos esenciales, grados de toxicidad y medios físicos por la presencia *Sargassum* en Cancún, Quintana Roo

Cuitláhuac Alfonso Rovirosa Madrazo<sup>1</sup>, Armando Guadarrama<sup>2</sup>  
& David R. Escobar<sup>3\*</sup>

### Resumen

**Los florecimientos de macroalgas están aumentando a nivel global.** La costa del Caribe Mexicano recibió desde el verano de 2014 hasta el invierno de 2015, cantidades masivas atípicas de las macroalgas pardas pelágicas (*Sargassum fluitans* y *S. natans*). La acumulación y descomposición de estas en playas y aguas litorales afectó los ecosistemas costeros, la salud humana y la industria turística, que es el motor económico local. En el mes pico de acumulación, la costa recibió en promedio 2,360 m<sup>3</sup> de sargazo por km de playa. De manera emergente, se establecieron comités con participación de instancias gubernamentales, científicas y empresariales, se elaboraron reglamentos para remover dicho sargazo y con la aportación del gobierno federal para contrarrestar el impacto, se contrató maquinaria y empleados para la remoción. A pesar de estos esfuerzos, el alto volumen que recaló superó la capacidad de remoción. Los niveles de contaminación encontrada obedecen a la presencia del sargazo con azufre, metales pesados y arsénico; al igual que en el agua bacterias heterotróficas, pesticidas complejos y sulfato de amonio. Las técnicas utilizadas fueron sensores remotos, difracción de rayos X con microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía Raman en el laboratorio de microscopía electrónica del INAOE. Se compararon elementos químicos presentes en arena virgen vs. Arena tratada para medir residualidad, toxicidad y grado de pureza de la arena tratada. Se encontraron contaminantes P, H<sub>2</sub>S, Au, Ag, %/ppm.

**Palabras clave:** toxicidad, sargazo, arena, contaminantes.

Recibido: 19 de octubre de 2019

### Abstract

**Algae macro blooms are increasing globally.** The Mexican Caribbean coast received atypical massive amounts of the pelagic brown seaweed (*Sargassum fluitans* and *S. natans*) from summer 2014 to winter 2015. The accumulation and decomposition of algae in beaches and coastal waters affected coastal ecosystems, the Human health and the tourism industry, which is the local economic engine. In the peak accumulation month, the coast received an average of 2,360 m<sup>3</sup> of sargassum per km of beach. Committees were established with governmental, scientific and business instances participation. Regulations were developed to remove the sargassum from beaches and coastal waters, and with the federal government counteract the impact, and machinery and employees were hired to remove the sargassum. Despite these efforts, the high volume produced exceeded the removal capacity. The levels of contamination found are due to sargassum with sulfur, heavy metals and arsenic, as well as in the water heterotrophic bacteria, complex pesticides and ammonium sulfate. The techniques used were remote sensors, X-ray diffraction with scanning electron microscopy (SEM) and Raman microscopy in the INAOE electron microscopy laboratory. Chemical elements present in virgin sand were compared. Treated sand to measure residuality, toxicity and purity grade of the treated and Contaminants P, H<sub>2</sub>S, Au, Ag. %/ppm.

**Key words:** toxicity, sargassum, sand, persistents.

Aceptado: 14 de febrero de 2021

<sup>1</sup> INAOE-CONACYT Claustro de Biomedicina. Luis Enrique Erro # 1, Tonantzintla 72840, Puebla, México.

<sup>2</sup> INAOE-CONACYT Dirección de desarrollo tecnológico. Luis Enrique Erro # 1, Tonantzintla 72840, Puebla, México.

<sup>3</sup> Thermo Fisher Scientific-México. Fresnos 40 BM, Col. Tlacopac Del. Alvaro Obregón C.P. 01049 Ciudad de México.

\* **Autor de correspondencia:** [crovirosa@inaoep.mx](mailto:crovirosa@inaoep.mx) (CARM)

## Introducción

Para las poblaciones humanas en la franja litoral de Cancún, en el municipio de Benito Juárez, Quintana Roo, la acumulación masiva de sargazo representa irritabilidad olfativa, que no debe subestimarse, aunque parezca un problema de salud momentáneo, sin daños graves hasta ahora; sin embargo, dadas las concentraciones de H<sub>2</sub>S (sulfuro de hidrógeno) es necesario tomar medidas preventivas que mitiguen el impacto en la salud a largo plazo como producto de una exposición crónica.

Aunado a lo anterior, la dimensión de la biomasa de sargazo a movilizar es totalmente incierta, debido a que no se conocen con precisión y prontitud los volúmenes que se deben procesar en una temporada e incluso los volúmenes instantáneos (diarios a semanales). Por otro lado, la presencia del sargazo corresponde muy probablemente a distintas variables ambientales, ecológicas, antropogénicas, así como de orden geológico, cambio climático y calentamiento a escala global.

Para los actores económicos, principalmente el sector turismo, el problema del sargazo representa una reducción considerable del atractivo y de las actividades de turismo propias del lugar, obstaculizando localmente la pesca artesanal, la degradación de los bienes como la erosión grave de playas y la disminución significativa de la facturación de la actividad económica derivada del sector turismo de la Península de Yucatán.

La arribazón de sargazo en las playas es un fenómeno muy fluctuante y difícil de predecir, que conduce a construir escenarios complejos para su cosecha y disposición metodológica contenida en una normatividad oficial; sin embargo, el fenómeno resulta ser riesgoso por sus posibles

contenidos tóxicos químico-biológicos. Adicionalmente, la inversión financiera específica para su manipulación actual por parte de las autoridades implicadas, sin tener certidumbre científica sobre el grado de toxicidad, ha resultado ser ineficiente e ineficaz.

La acumulación de sargazo produce la alteración de ciertos entornos y ciclos naturales biogeoquímicos, ya sea por la presencia del sargazo que se depositó (Fig. 1) o por las acciones de cosecha y disposición como residuo en las propias zonas hoteleras y urbanas de Cancún (Fig. 2), que requieren una atención estratégica y prioritaria.



**Figura 1.** Mortandad de fauna marina atrapada por masas de sargazo (peces) que llegan a la playa de Cancún, Q. Roo en el arribazón del 2018 (Fotografía: INAOE-CONACYT).



**Figura 2.** Vista aérea de la arribazón de sargazo en Playa del Carmen, municipio Benito Juárez; Quintana Roo, México, 2018 (Fotografía: INAOE-CONACYT).

En el presente trabajo se realizaron análisis ultraestructurales, de elementos esenciales, grados de toxicidad y de medios físicos por la presencia del sargazo (*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*) en las playas de Cancún, Quintana Roo, México.

## Material y métodos

En el presente trabajo se realizó un análisis espacial con infrarrojo cercano (IR) mediante el uso del sensor remoto de la ESA especie *Sentinel 2* para determinar la ubicación geográfica y condiciones ambientales de la masa de sargazo para su prospección, monitoreo y muestreo, en el momento de mayor presencia en la franja litoral (julio-octubre del 2018).

Para la prospección satelital de sitios *ex situ-in situ* se utilizaron las imágenes del satélite *Sentinel 2*, así como la digitalización en el SIG-ArcView y ErdMap de los medios físicos, de arena contaminada por sargazo litoral y, especímenes de *Sargassum*. Se realizó muestreo y monitoreo de especímenes de sargazo en aguas profundas a 10 km de la franja litoral y en la franja litoral costera. Simultáneamente, en la planta industrializadora de separación de arena contaminada de hotel en Cancún. En cada una de las visitas *in situ* se recolectaron muestras de sargazo vivo procedente de tres fuentes: a) especímenes en el mar, b) especímenes en la playa y c) especímenes de la planta procesadora de arena del Hotel Moon Palace Cancún.

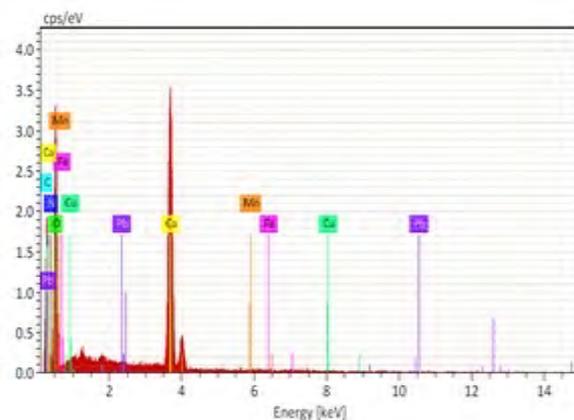
Los especímenes recolectados se depositaron en bolsas y frascos estériles, bolsas especiales con sellado hermético, frascos con formaldehído y glutaraldehído para su fijación y conservación, marcados con el método del sistema de cadena de custodia y con la determinación de coordenadas geográficas con un GPS Garmin, por

tipo, especie, hora, temperatura y sitio de recolección y en orden cronológico de recolección. Todas las muestras fueron refrigeradas con hielo para su traslado al laboratorio de microscopia electrónica del INAOE para su determinación y análisis de rayos X MEB y espectroscópica de infrarrojo RAMAN.

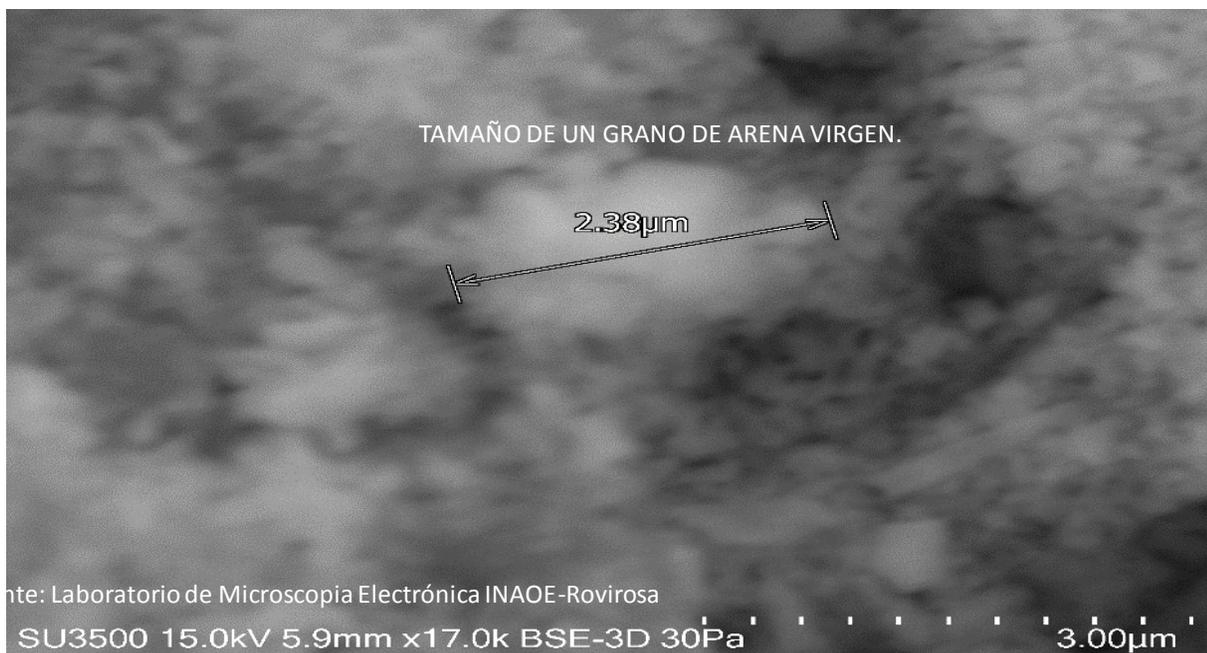
Posteriormente, se aplicó el Protocolo de orden biológico para estudio en microscopia electrónica de barrido (MEB) con difracción de rayos X, análisis superficial de elementos esenciales y el protocolo de microscopía Raman para especímenes biológicos en su estado natural. Las muestras y especímenes se trasladaron para su estudio al laboratorio de microscopía electrónica (LME) del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en Puebla.

## Resultados

En el análisis por difracción de  $R_x$  MEB se determinaron los elementos químicos presentes en estado natural de la arena (Fig. 3), así como las características morfométricas y la morfología del grano de arena de la franja litoral de Cancún, Quintana Roo (Fig. 4).



**Figura 3.** Análisis espectral de arena virgen de Cancún que permite la determinación de elementos naturales presentes en granos de arena. Se observa presencia de C, N, O, Ca, Mn, Fe, Cu, Pb.



**Figura 4.** Morfometría y morfología de un grano de arena virgen, procedente de la franja litoral de Cancún, Quintana Roo; México. Fuera de la zona impactada por la especie invasiva. El tamaño del grano promedio es 2.38  $\mu\text{m}$  se observa la pureza del grano. Imagen a 15 oKv y resolución de 3  $\mu\text{m}$ .

De igual manera, se obtuvieron las concentraciones (%/ppm) de los elementos de mayor importancia contenidos en la arena virgen de las playas de Cancún, Q. Roo (Tabla I).

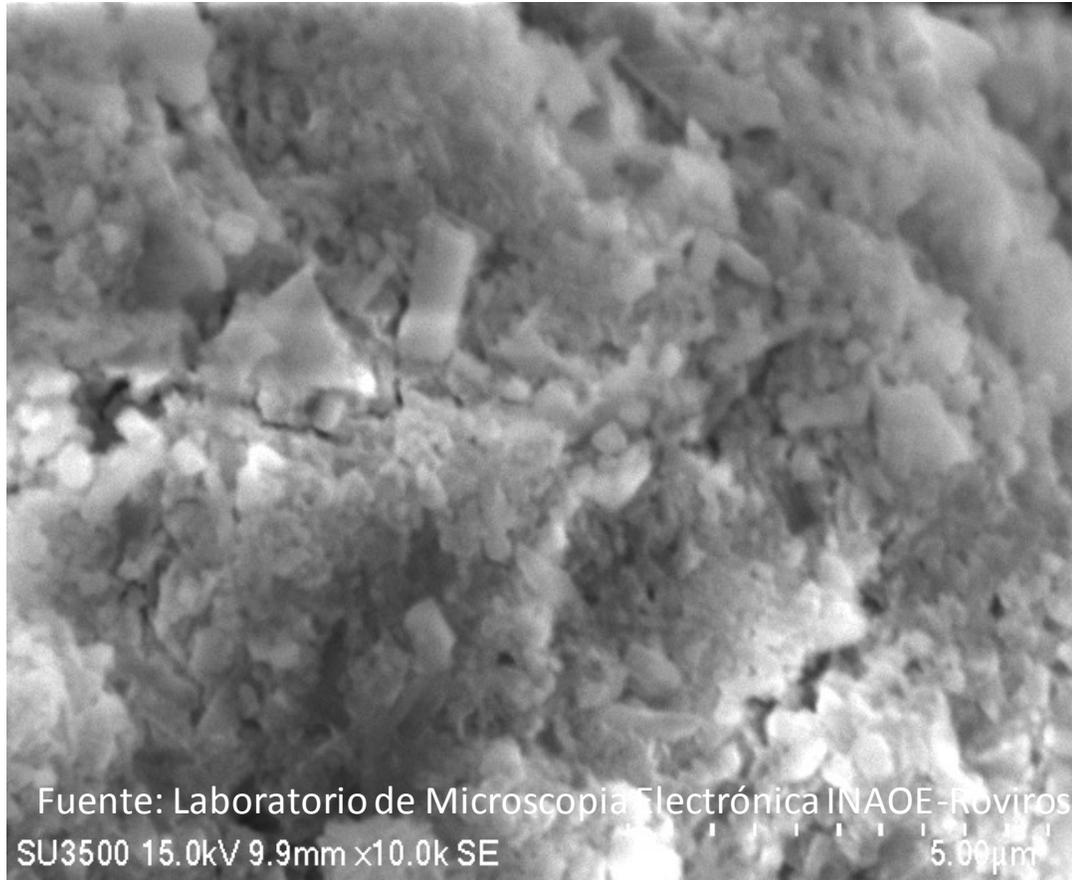
La morfometría y morfología de la arena separada del sargazo se observa en la figura 5, mientras que en la figura 6 se pueden observar las mismas características pero en la arena separada del sargazo mecánicamente.

En el barrido de dispersión (Fig. 7) encontramos una alta concentración espacial de elementos químicos como el oxígeno, cadmio, manganeso, fierro, plomo, cobre, nitrógeno y silicio presentes en el sargazo.

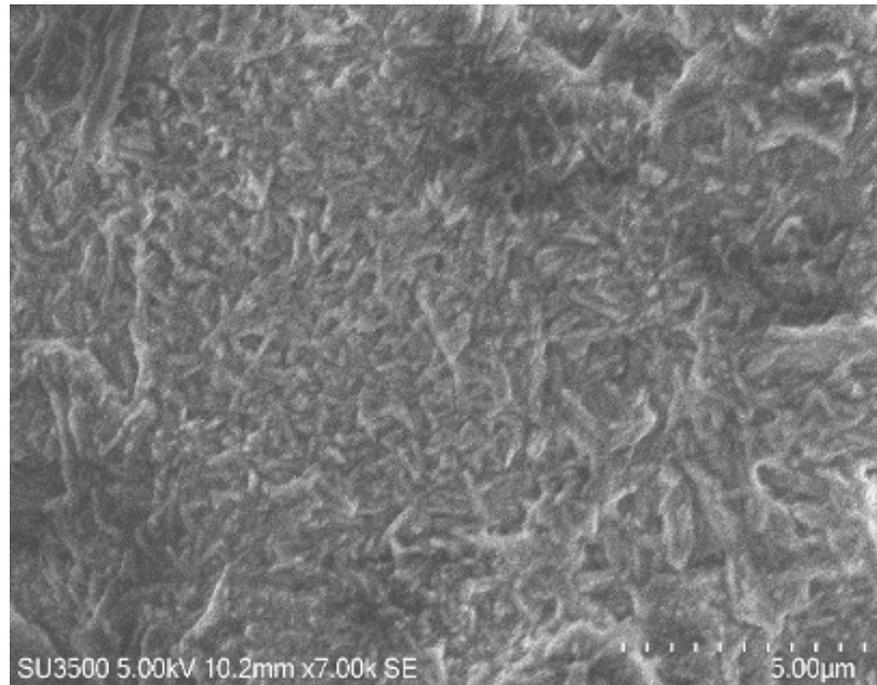
Respecto al análisis espectral de la arena contaminada con *Sargassum*, en la figura 8 se puede observar las concentraciones de diferentes elementos en los granos de arena.

**Tabla I.** Concentraciones en %/ppm de los elementos de mayor importancia contenidos en arena virgen Cancún, Q. Roo. C, N, O, Ca, Mn, Fe, Cu, Pb.

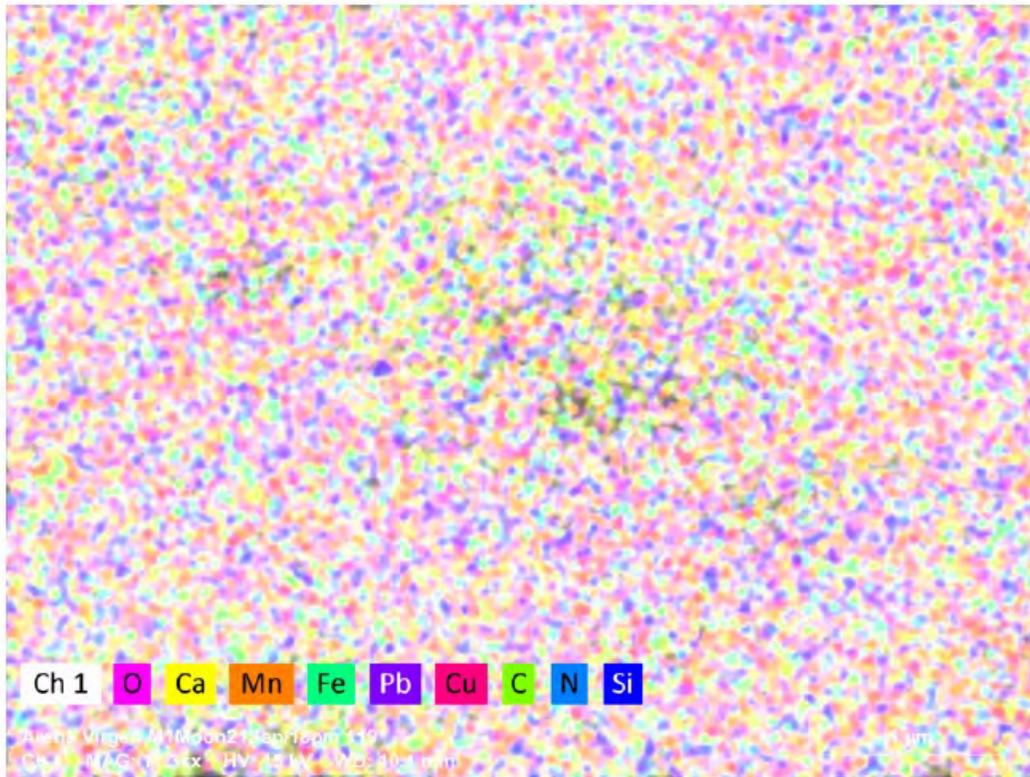
Elemento	At. No.	Netto	Masa (%)	Masa normal (%)	Atom (%)	abs. error (%) 1 sigma	abs. error (%) 1 sigma
Carbón (C)	6	0	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
Nitrógeno (N)	7	264	5.02	4.33	6.13	1.76	35.11
Oxígeno (O)	8	8738	72.58	62.58	77.66	10.39	14.31
Calcio (Ca)	20	17289	37.55	32.38	16.04	1.19	3.17
Manganeso (Mn)	25	47	0.26	0.23	0.08	0.07	25.18
Fierro (Fe)	26	4	0.03	0.02	0.01	0.01	53.30
Cobre (Cu)	29	13	0.20	0.17	0.05	0.08	41.04
Plomo (Pb)	82	150	0.34	0.29	0.03	0.06	17.28
		Sumatoria	115.98	100	100		



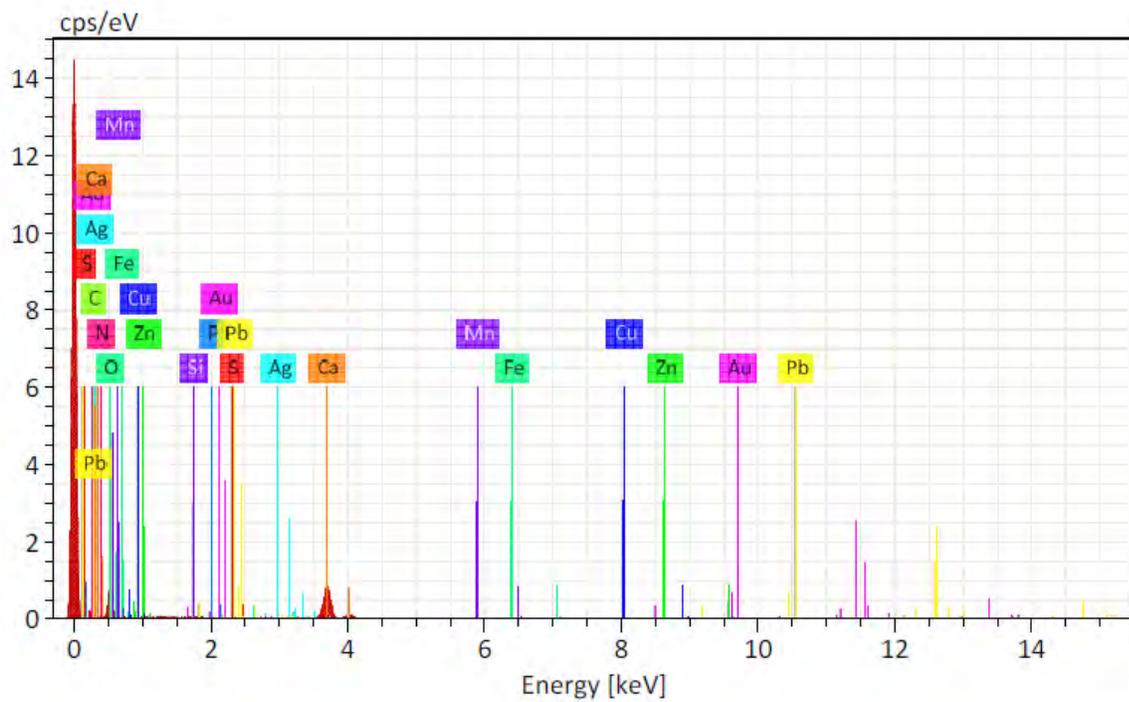
**Figura 5.** Morfometría y morfología de un grano de arena virgen, procedente de la franja litoral de Cancún, Quintana Roo; México. Fuera de la zona impactada por la especie invasiva. El tamaño del grano promedio es 2.38  $\mu\text{m}$  se observa la pureza del grano. Imagen a 15 oKv y resolución de 3  $\mu\text{m}$ .



**Figura 6.** Morfometría y morfología de arena separada del sargazo mecánicamente, procedente de la franja litoral de Cancún, Quintana Roo; México. En el tamaño del grano se observa la impureza del grano. Imagen a una 15 oKv y resolución de 5  $\mu\text{m}$ . Se aprecian fibras del tejido del sargazo enlazando con las microvellosidades y la arena



**Figura 7.** Barrido de dispersión de elementos químicos (%/ppm) con difracción de  $Rx$ , de la arena contaminada por separación mecánica del sargazo. Se aprecian elementos presentes en *Sargassum*. La presencia por colores indica alta concentración espacial.

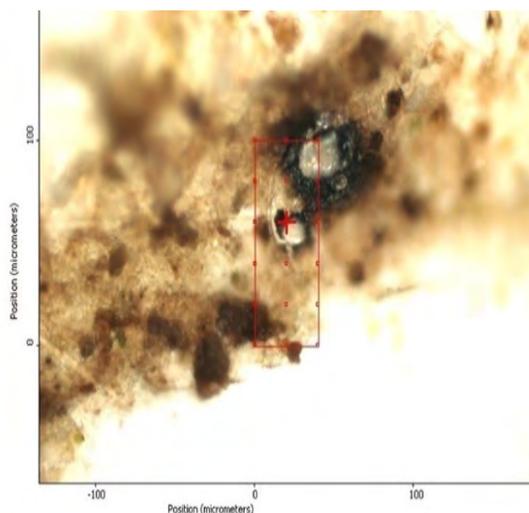


**Figura 8.** Análisis espectral de arena contaminada con *Sargassum*. Que permite la determinación % de elementos presentes en granos de arena contaminada. Se observa presencia de C, N, O, Ca, Mn, Fe, Cu, Pb. Adicionalmente, la presencia por el sargazo incrustado de: P,  $H_2S$ , Au, Ag.

**Tabla 2.** Concentraciones en %/ppm de los elementos contenidos en arena virgen C, N, O, Ca, Mn, Fe, Cu, Pb. Adicionalmente aparecieron por presencia de sargazo incrustado P, Au, Ag y H<sub>2</sub>S.

Elemento	At. No.	Netto	Masa (%)	Masa normal (%)	Atom (%)	abs. error (%) 1 sigma	abs. error (%) 1 sigma
Carbón (C)	6	0	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
Nitrógeno (N)	7	114	4.86	4.77	6.71	2.33	47.90
Oxígeno (O)	8	3459	64.23	63.14	77.67	10.82	16.84
Silice (Si)	14	0	0.00	0.00	0.00	0.00	2.15
Fósforo (P)	15	46	0.13	0.13	0.08	0.05	35.68
Sulfuro (S)	16	33	0.09	0.09	0.06	0.04	46.07
Calcio(Ca)	20	6440	31.64	31.11	15.28	1.08	3.40
Manganeso (Mn)	25	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88
Hierro (Fe)	26	7	0.11	0.11	0.04	0.07	62.70
Cobre (Pb)	29	0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14
Zinc (Zn)	30	11	0.52	0.51	0.15	0.19	35.86
Plata (Ag)	47	4	0.02	0.02	0.00	0.01	50.93
Oro (Au)	79	0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.73
Plomo (Pb)	82	21	0.12	0.12	0.01	0.05	44.28
Sumatoria			101.73	100	100		

Como parte de los análisis realizados a *Sargassum*, se estudió el tejido con microscopia Raman (MR) para determinar el grado de toxicidad oceánica y su probable residualidad por el arrastre de partículas sedimentarias presentes en el mar, encontrando cristales de H<sub>2</sub>S (Fig. 9).



**Figura 9.** Imagen de la espina de flotación de *Sargassum*. Vista en x20 en MR, en el blanco se aprecian cristales de H<sub>2</sub>S que pudieron ser recolectados en la trayectoria de movilidad oceánica en la trayectoria de su recorrido como partículas sedimentarias hidrológicas; sean éstas por la huella de azufre atmosférico, o bien, por azufre de orden geológico del ciclo de azufre.

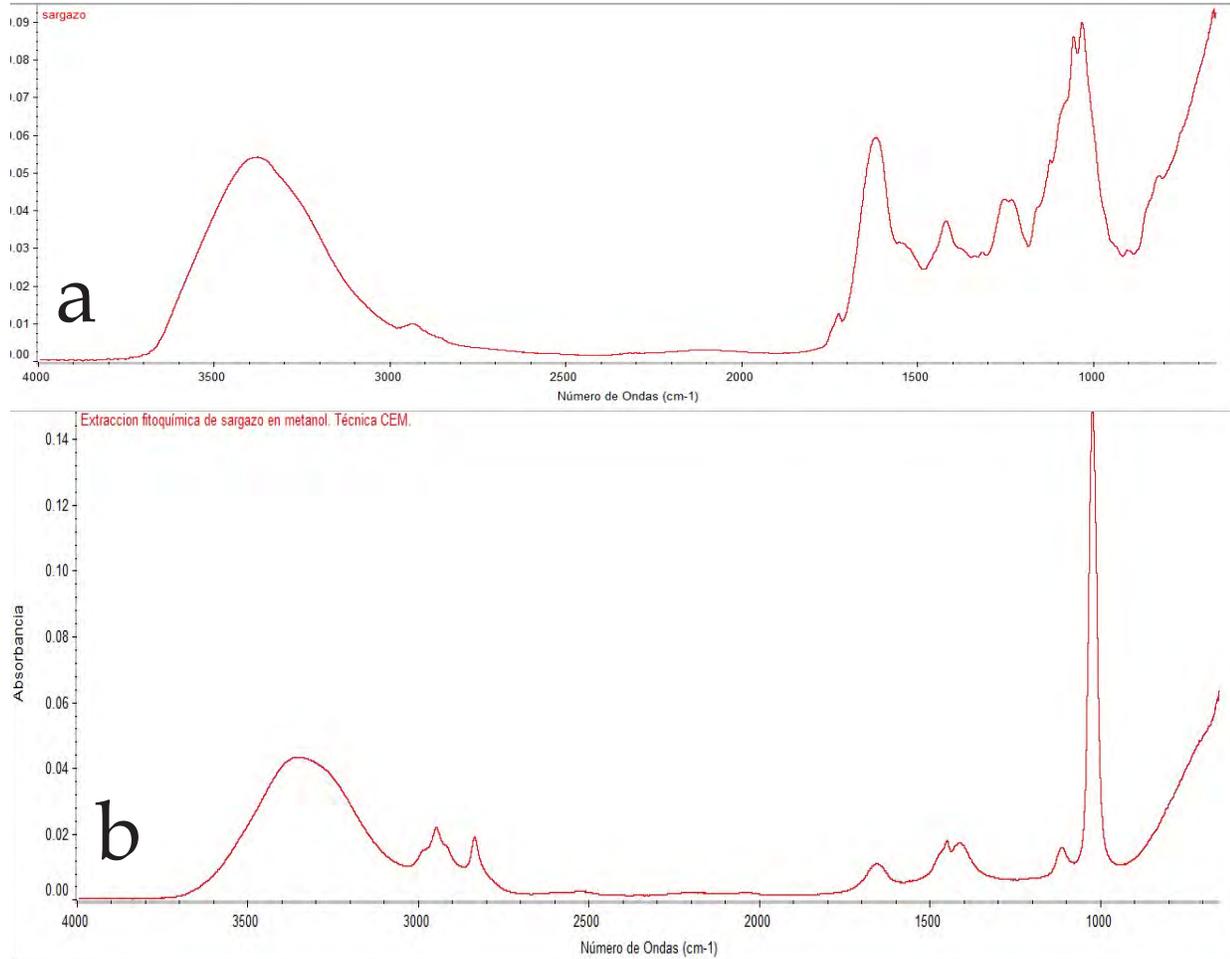
Por otro lado, se observó un alto contenido de cristales incrustados de agua y presencia de H<sub>2</sub>S en tejido de sargazo (Fig. 10a, b). Asimismo, se detectó la presencia de espinas de flotación de *Sargassum* (Fig. 11).

En la figura 12 se muestra la dispersión y distribución atmosférica de la huella de azufre generada en México y su probable causa de generación de partículas sedimentarias que generan parte de la contaminación oceánica por medio del ciclo hidrológico.

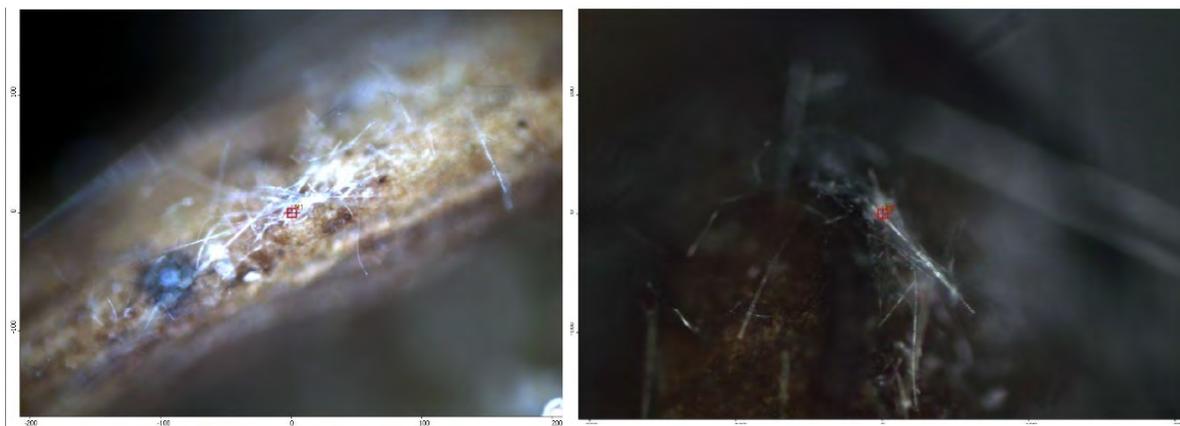
En el caso del sargazo extruido para su manipulación y reducción volumétrica, la figura 13 muestra la morfología utilizada para medir la residualidad de sus componentes tóxicos.

Mediante micrografía fue posible obtener las imágenes de la bolsa de flotación de *Sargassum* (Fig. 14) y fue posible determinar la fluorescencia presente en la bolsa de flotación de *Sargassum* (Fig. 15). De la misma forma, fue posible establecer el análisis espectral por difracción de Raman en la bolsa de flotación (Fig. 16 y 17).

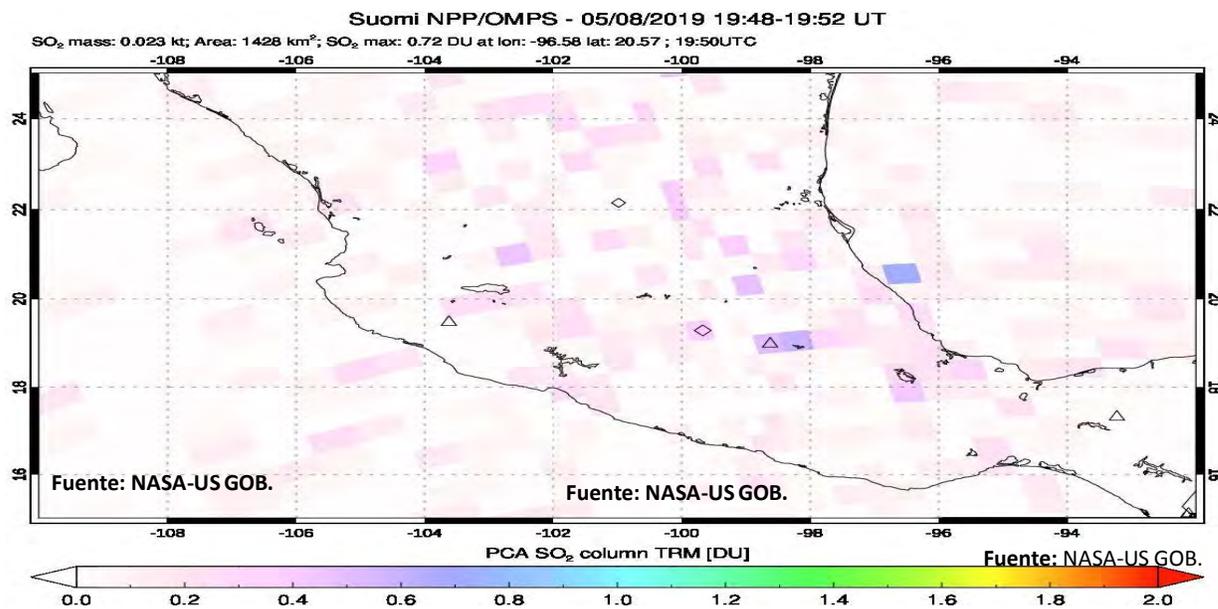
En cuanto a las concentraciones de sustancias tóxicas contenidas en el agua oceánica, la figura 18 muestra el espectro de Raman obtenido para tal fin.



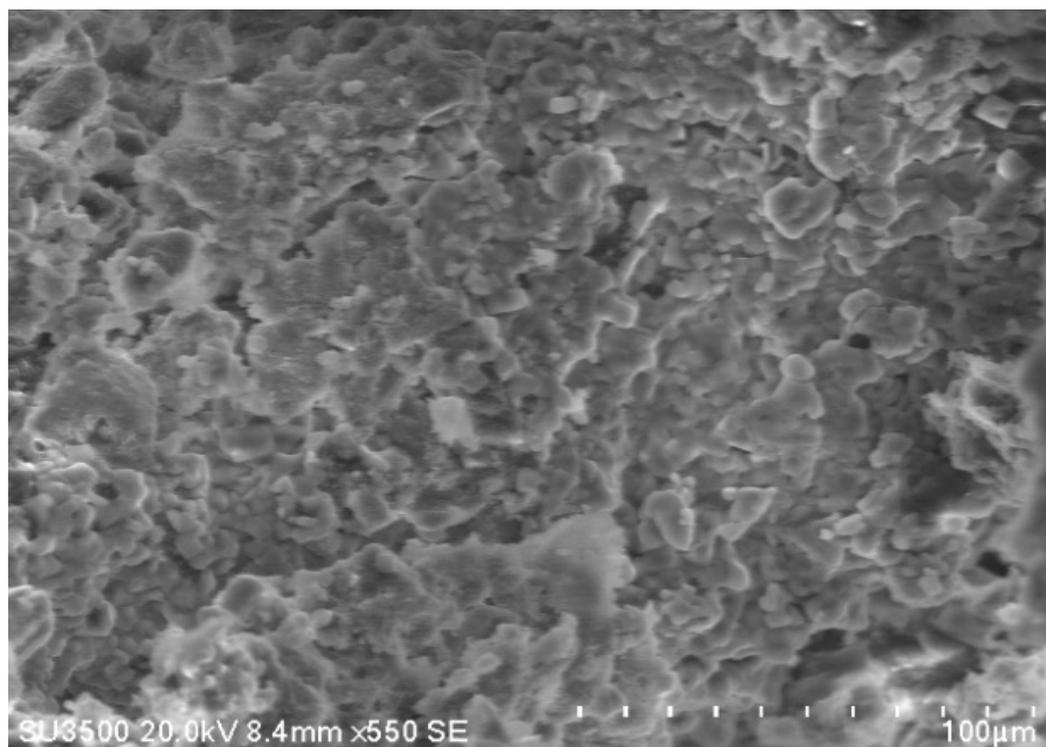
**Figura 10.** Dispersión Raman (a= Espectro 1, b= Espectro 2) de los cristales de azufre intersticial en tejido de *Sargassum*. Se observa alto contenido de agua y presencia de azufre H<sub>2</sub>S (LME-INAOE/TFS 2019).



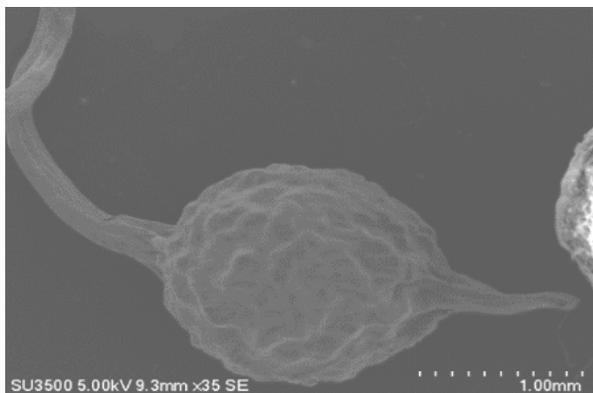
**Figura 11.** Espina de flotación de *Sargassum*. Vista en MR a una resolución de x20. Se aprecian microvellosidades (tricomas) de flotación (LME-INAOE/TFS 2019).



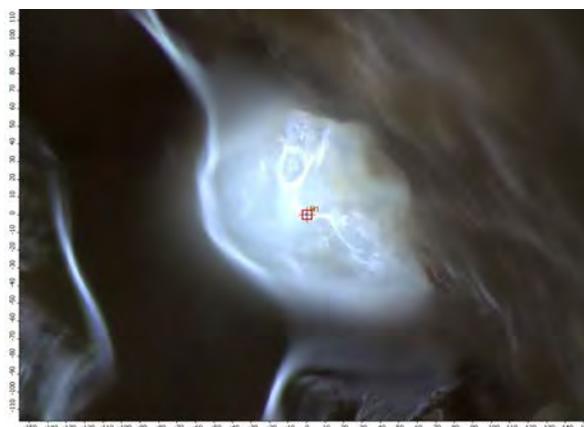
**Figura 12.** Imagen geográfica de la dispersión y distribución atmosférica de la huella de azufre de México, probable causa de generación de partículas sedimentarias que generen parte de la contaminación oceánica por medio del ciclo hidrológico (Fuente: NASA-USGOB).



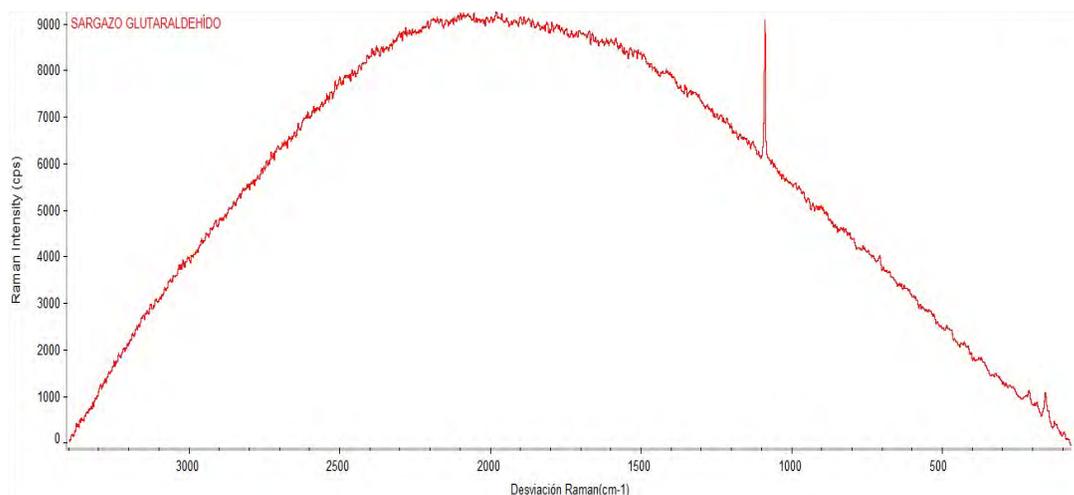
**Figura 13.** Morfología del sargazo extruido estudiado para medir residualidad de sus componentes tóxicos por mediante micrografía MEB (LME-INAOE 2018).



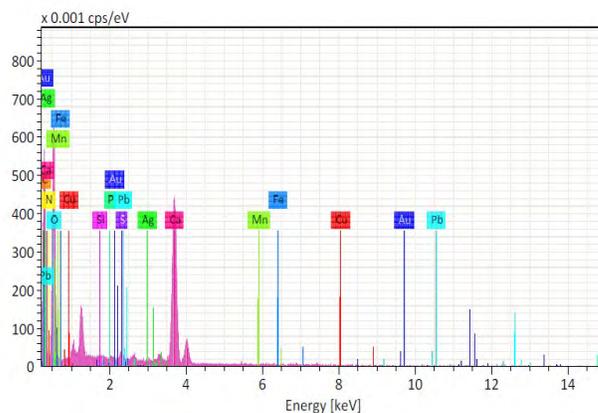
**Figura 14.** Bolsa de flotación de *Sargassum*. Vista al MEB en x35 a 1mm de resolución con contenido de aire en su estado natural (LME-INAOE 2018).



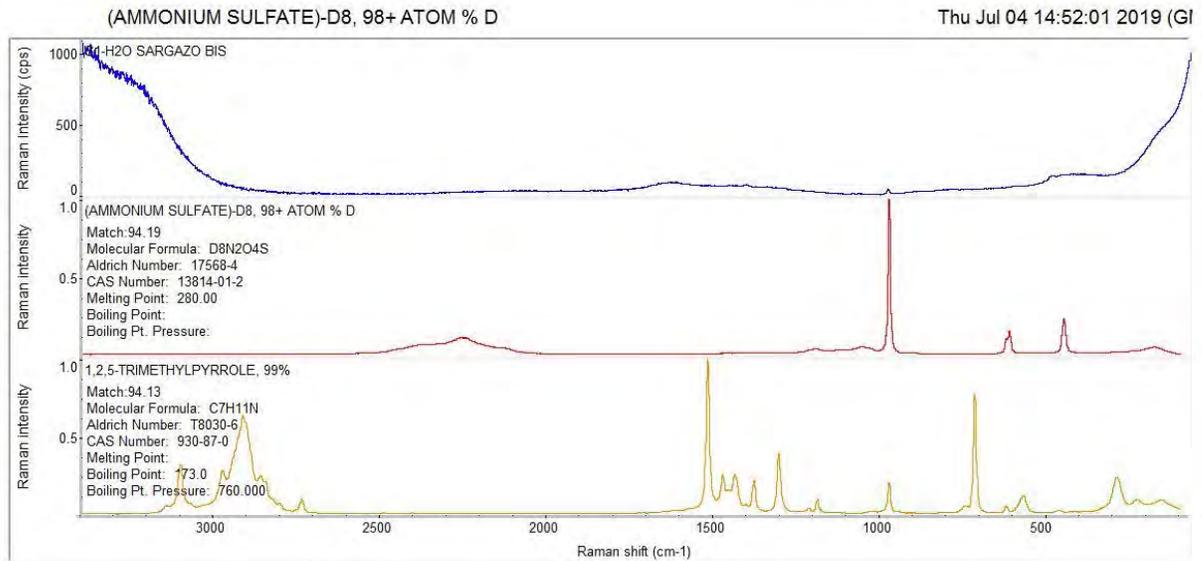
**Figura 15.** Determinación de la fluorescencia presente en la bolsa de flotación de *Sargassum* y la intensidad de energía presente por la presencia de  $H_2S$  y metales pesados (LME-INAOE/TFS 2019).



**Figura 16.** Análisis espectral por difracción de Raman en la bolsa de flotación de *Sargassum*. Esta bolsa demuestra la intensidad de energía presente por la presencia de  $H_2S$  (LME-INAOE/TFS 2018).



**Figura 17.** Análisis espectral de tejido de la bolsa de flotación de *Sargassum* sp. Que permite la determinación de elementos esenciales presentes %/ppm. Se observa C, N, O, Ca, Mn, Fe, Cu, Pb. Adicionalmente por el sargazo incrustado de: P,  $H_2S$ , Au, Ag (LME-INAOE 2018).



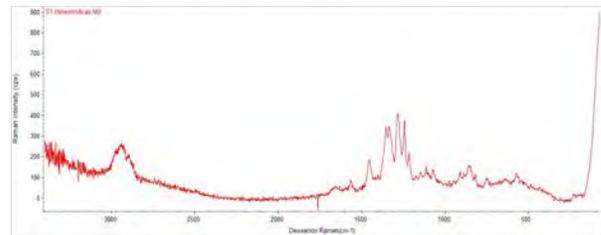
**Figura 18.** Espectro Raman de concentraciones y sustancias toxicas presentes en el agua estudiada, incluyen Sulfato de amonio y pesticidas complejos (LME-INAOE/TFS 2019).

En cuanto a las bacterias heterotróficas presentes en el agua litoral de las playas de Cancún, la figura 19 muestra el análisis por difracción de Raman y en la figura 20 se aprecian los umbrales de energía.

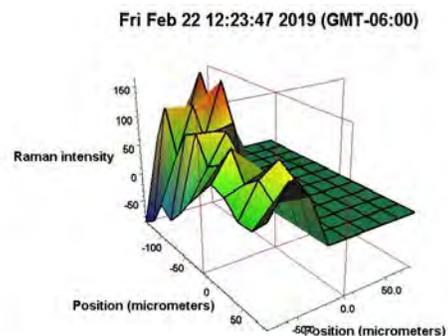
## Discusión

La determinación del grado de peligrosidad al humano producida por *Sargassum*, ha generado polémicas y discusiones sobre su posible toxicidad. Lo que si apreciamos en el presente estudio es la existencia de una presencia considerable de azufre que genera toxicidad, metales pesados, bacterias y compuestos tóxicos producto del efecto antropogénico continental y del propio Estado de Quintana Roo.

Con las metodologías científicas y tecnológicas utilizadas se hace incuestionable la presencia toxicológica ambiental y ecológica del sargazo. Igualmente nos queda claro que el sargazo tiene la función de limpiar la toxicidad residual del mar, además de servir como mecanismo de equilibrio, ignorando ese paso de salud oceánica evolutiva y natural, que tienen y han tenido todas las especies cuaternarias ante los grandes cambios de las eras del planeta en los fenómenos de transgresión



**Figura 19.** Dispersión espectral por difracción de Raman, se aprecia la fluorescencia presente en colonias de bacterias de la tableta de cultivo de agua de playa. El espectro demuestra la presencia de H<sub>2</sub>S metabólico y otros compuestos (LME-INAOE/TFS 2019).



**Figura 19.** Espectro de los umbrales de energía Raman utilizados en el análisis de bacterias presentes en medio de cultivo y tabletas (LME-INAOE/TFS 2019).

y regresión oceánica, donde las especies dan saltos evolutivos y generan nuevos sistemas de vida.

Son preocupantes las concentraciones de azufre residual en la arena por la separación mecánica del sargazo; Igualmente, los metales pesados y colonias de bacterias heterotróficas, que dan un claro indicador de contacto con aguas residuales urbanas en las playas y consecuentemente residualidad tóxica en los sitios con semáforo rojo.

## Agradecimientos

AI INECC-SEMARNAT, CIATQ-CONACYT/QUERÉTARO, Thermo Fisher Scientific, Grupo Falcón México, Hotel Moon Palace. A dos revisores anónimos que realizaron comentarios y sugerencias para mejorar el presente trabajo.

## Referencias

- Amy, N. S. 2011. Summary of Sea Education Association Long-Term Sargasso Sea Surface Net Data, Associate Professor / Chief Scientist Sea Education Association. ISBN 978-0-9897520 9-6. Sweden.
- Williams & Wilkins. 1994. Determinative Bacteriology. Baltimore, USA.
- Roberts, J. 2011. Traffic in the Sargasso Sea An Analysis of International Shipping Activities and their Potential Environmental Impacts. Australian National Centre for Ocean Resources and Security (ANCORS) University of Wollongong Wollongong, New South Wales ISBN 978-0-9892577-1-8. Sweden.
- Parson, L. & R. Edwards. 2011. The Geology of the Sargasso Sea Alliance Study Area Potential Non-Living Marine Resources and an Overview of the Current Territorial Claims and Coastal States Interests. Waitt Foundation. Additional support provided by: WWF Sweden and the Pew Environment Group. ISBN 978-0-9847520-7-2. Maritime Zone Solutions Ltd, UK.
- Ardron, J., Halpin, P. J. Roberts, J., Cleary, J., Moffitt, R. & B. Donnelly. 2009. Where is the Sargasso Sea?, Waitt Foundation. Additional support provided by: WWF Sweden and the Pew Environment Group. ISBN 978-0-9847520-3-4. Washington D.C., USA.
- Rovirosa Madrazo, C. A. 2007. Prospección dasométrica de la familia Cyatheaceae en restauración en Cuetzalan, Puebla. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, INIFAP, SciELO, ISSN 2007-1132, México.
- Sumaila, U.R., Vats, V. & W. Swartz. 2006. Values from the

Resources of the Sargasso Sea. Sargasso Sea Alliance Science Report Series. Sargazo Alliance, ISBN 978-0-9892577-4-9. Sweden.

Yacamán, M. J., Reyes, J. 1995. Una Visión Del Microcosmos. UNAM, México D.F.