

EVALUACIÓN DE CHLOROPHYTAS COMO INDICADORAS DE CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN EL LITORAL SUR DE SANTO DOMINGO

Evaluation of Chlorophytas as indicators of contamination by heavy metals in the south coast of Santo Domingo

ELVIS NICOLÁS MELÉNDEZ^a

Recibido: 6/11/2022 • Aprobado: 4/12/2022

Cómo citar: Meléndez, E. N. (2022). Evaluación de Chlorophytas como indicadoras de contaminación por metales pesados en el litoral sur de Santo Domingo. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 5(2), 31–64. <https://doi.org/10.22206/cac.2022.v5i2.pp31-64>

Resumen

*Las Chlorophytas han sido utilizadas en estudios de contaminación en metales pesados anteriormente. Estas algas tienen la capacidad de acumularse en grandes alfombras de talos que flotan y se adhieren en las rocas intermareales y costeras. Los metales pesados son sustancias que pueden ser tóxicas en bajas concentraciones. Existen métodos para la detección de estos metales como la Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA). Esta metodología se puede utilizar con organismos que adsorben estos metales como, por ejemplo, las macroalgas. Se identificaron *Ulva fasciata* y *Chaetomorpha gracilis*, las cuales se acumulan en el litoral sur de Santo Domingo. Para buscar una forma natural de detección para la acumulación de este material biológico contaminante, *U. fasciata* y *C. gracilis* fueron evaluadas para ser consideradas como bioindicadores de contaminación por metales pesados. Se obtuvieron concentraciones promedio en *U. fasciata* para el cobre de 15.968 mg/kg, para el hierro de 102.985 mg/kg y para el cinc de 63.598 mg/kg. En *C. gracilis*, para el cobre de 62.207 mg/kg, para el hierro de 2426.081 mg/kg y para el cinc de 97.555 mg/kg. Se pudo evaluar que la división Chlorophyta sí puede ser bioindicador de metales pesados en el litoral sur de Santo Domingo, República Dominicana.*

Palabras clave: metales pesados; Chlorophyta; *Ulva fasciata*; *Chaetomorpha gracilis*; Espectroscopia de Absorción Atómica.

^a Egresado Licenciatura en Biotecnología. Área de Ciencias Básicas y Ambientales. Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC). Santo Domingo, República Dominicana. ORCID: 0000-0001-5595-6892, Correo electrónico: enme94@gmail.com



Abstract

Chlorophytas have been used in heavy metal contamination studies before. These algae can accumulate in large mats of thallus that float and adhere to intertidal and coastal rocks. Heavy metals are substances that can be toxic in low concentrations. There are methods for the detection of these metals such as Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). This methodology can be used with organisms that adsorb these metals, such as macroalgae. Ulva fasciata and Chaetomorpha gracilis were identified, which accumulate on the southern coast of Santo Domingo. To find a natural form of detection for the accumulation of this contaminating biological material, U. fasciata and C. gracilis were evaluated to be bioindicators of contamination by heavy metals. Average concentrations were obtained in U. fasciata for copper of 15.968 mg/kg, for iron of 102.985 mg/kg and for zinc of 63.598 mg/kg. In C. gracilis for copper of 62.207 mg/kg, for iron of 2,426.081 mg/kg and for zinc of 97.555 mg/kg. It was possible to evaluate that the Chlorophyta division, can be a bioindicator of heavy metals in the southern coast of Santo Domingo, Dominican Republic.

Keywords: Heavy metals; Chlorophyta; *Ulva fasciata*; *Chaetomorpha gracilis*; Atomic Absorption Spectroscopy.

Introducción

Las acciones antropogénicas han causado daños irreversibles al medio ambiente. Podemos notar evidencia de contaminación en los afluentes y zonas costeras que se encuentran cerca de viviendas y lugares dinámicos con actividades humanas (Escobar, 2002). Según Encinas (2011),

se entiende por contaminación la presencia en el aire, agua o suelo de sustancias o formas de energía no deseables, en concentraciones tales que puedan afectar al confort, salud y bienestar de las personas, y al uso y disfrute de lo que ha sido contaminado. (p. 3).

Los metales pesados son considerados contaminantes muy comunes en lugares con alta densidad de actividad humana (García et al., 2002).

Se denomina 'metales pesados' a cualquier elemento metálico y metaloide que tiene una densidad relativamente alta, que varía de 3.5 a 7 g/cm³ y es tóxico o venenoso a bajas concentraciones, e incluye mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), cinc (Zn), níquel (Ni), cobre (Cu) y plomo (Pb) (Gautam et al., 2014, p. 1).

La metodología de detección de metales pesados en agua y sedimentos tiene ciertos obstáculos para la obtención de resultados. El análisis de sedimentos sufre limitaciones; las concentraciones de un metal en sedimento dependen, además de otros factores, de la tasa de deposición y la naturaleza de las partículas (Phillips, 1997; Villares et al., 2001). Para resolver esta problemática, Villares et al. (2001) describen que se pueden utilizar organismos que nos pueden brindar la facilidad de detectar estos metales, para esto se considera que el organismo puede ser adecuado como bioindicador, si este es sésil o sedentario, tolerante a grandes niveles de contaminación y diversos rangos de salinidad. La utilización de un organismo que prolifere en estas condiciones es apta para el seguimiento de una investigación como la presente. Como se menciona, una buena elección para el estudio es la utilización de algas, específicamente las macroalgas. Los metales pesados obtenidos están adheridos a las algas localizadas en el litoral sur de Santo Domingo, República Dominicana, las cuales se tomaron de un ecosistema costero.

Las algas son un grupo muy diverso de organismos fotosintéticos. Las macroalgas son morfológicamente mucho menos complejas que las plantas vasculares, ya que carecen de raíces, tallos, hojas, flores y frutos, lo mismo que de tejidos de conducción (Espinoza, 2005). En el caso de las Chlorophyta (algas verdes), su rol ecológico se encuentra en que son responsables de la mayor parte de la productividad primaria en algunos cuerpos de agua, a través de la fotosíntesis (Chakraborty et al., 2014).

Las macroalgas a menudo se consideran un indicador valioso de la contaminación por metales pesados en las zonas costeras, debido a su alto potencial de acumulación, facilitado por la presencia de tioles y péptidos (Lee & Wang, 2001). Además, Carvalho et al. (2008) exponen en su estudio, que las algas tienen un rico contenido de proteínas, polisacáridos, minerales y vitaminas.

Muchas especies de algas verdes crecen adheridas a sustratos rocosos y de concreto, en o cerca de la superficie del océano (Jayakumar et al., 2011). Un ejemplo de esto se puede ver en el género *Ulva*, el cual se caracteriza por ser muy abundante y se encuentra en todas partes de las comunidades bentónicas costeras del mundo (Wichard et al., 2015; Zhang et al., 2013a; Zhang et al., 2013b).

La capacidad de las algas para poder absorber metales pesados es denominada biosorción. La biosorción se caracteriza por la retención del metal mediante una interacción fisicoquímica del metal con ligandos presentes en la superficie celular, la cual se produce con grupos funcionales expuestos hacia el exterior celular, pertenecientes a partes de moléculas componentes de las paredes celulares, como por ejemplo carboxilo, amino, hidroxilo, fosfato y sulfhidrilo (Cuizano y Navarro, 2008). Hay que tomar en cuenta que existen tres categorías de metales pesados relacionados a la biosorción: los metales tóxicos (como Hg, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, As, Co, Sn, etc.), los metales preciosos (como Pd, Pt, Ag, Au, Ru, etc.) y radio-núclidos (como U, Th, Ra, Am, etc.), cuyos pesos específicos son usualmente mayores de 5 g/mL (Cuizano y Navarro, 2008).

El conocimiento de la flora marina caribeña es limitado en comparación con la larga historia de colecciones ficológicas realizadas en todo el mar Caribe. La literatura disponible parece indicar que la flora marina del Caribe insular está relativamente muy escasa, pero estas estimaciones de

diversidad, probablemente, reflejen un esfuerzo limitado de recolección e investigación. En la República Dominicana los estudios sobre ficología son muy escasos. Unos de los trabajos más completos es el de Betancourt y Herrera-Moreno (2001), que ofrece un listado de las principales algas bentónicas de la isla.

La taxonomía tradicional de *Ulva* se ha basado en características morfológicas como la forma y tamaño del talo, presencia/ausencia de dientes marginales, dimensiones celulares y número de pirenoides (Guiry y Guiry, 2020). Sin embargo, muchos estudios han demostrado que estas características son altamente variables (Zhang et al., 2013b; Wichard et al., 2015; Gao et al., 2016), por lo que la identificación a nivel de especies ha sido particularmente difícil, debido a la alta variabilidad morfológica y plasticidad fenotípica intraespecífica. En ese contexto, es fundamental el uso de herramientas complementarias como las técnicas moleculares, las cuales han tenido éxito en identificación de especies de *Ulva* (Baamondes et al., 2007; Aguilar-Rosas et al., 2008). Las especies del género *Ulva* son cosmopolitas y se distribuyen ampliamente, habitando todos los océanos del mundo.

El alga verde *Chaetomorpha*, descrita por Kützing (1845), puede crecer en ambientes con una amplia variabilidad de salinidad y temperatura, y es capaz de proliferar en aguas eutrofizadas (Tsutsui et al., 2010; Chen & Zou, 2015; Ge & Champagne, 2017; Meenakshisundaram et al., 1999). Además, *Chaetomorpha* a menudo se informa como una molestia en la acuicultura y, normalmente, se elimina y se descarta (Tsutsui et al., 2010). Sin embargo, este género puede representar una materia prima prometedora para diferentes propósitos debido a sus compuestos valiosos como proteínas, pigmentos, ácidos grasos y sus polisacáridos de la pared celular. *Chaetomorpha* sp., también posee una pared celular rígida con una parte exterior laminar que consiste, principalmente, en celulosa (Nicolai y Preston, 1952). La especie *C. gracilis* se caracteriza por tener una distribución cosmopolita.

En esta investigación, se analizan las algas identificadas de la clasificación Chlorophyta (*Ulva fasciata* y *Chaetomorpha gracilis*) para evaluar si estas pueden ser indicadoras de contaminación de metales pesados, a través de la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA), tomadas de una zona de muestreo de tipo costero-marítimo en el sur de la ciudad de Santo Domingo, República Dominicana.

Antecedentes

Para la elaboración del análisis de metales pesados en algas existen varias técnicas, entre estas: Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA), Voltamperometría de Separación Anódica de Onda Cuadrada (VSAOC), Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (EEA-PAI), Microscopía Electrónica de Barrido acoplado a Espectrometría de Rayos X de Dispersión de Energía (MEB-EDX) (Pourkhabbaz et al., 2016; Tamayo et al., 2014; Kumar et al., 2009; Lai et al., 2003). El método por Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA) es la técnica más utilizada para determinar metales pesados en algas.

Existen normas en diversos países que explican cuáles son los límites de aceptación permisibles para los metales pesados, dependiendo del medio donde se encuentren (agua, suelo, aire, organismos, etc.). En República Dominicana no hay normas que representen los límites de aceptación de metales pesados en algas.

Tras la recolección de las algas en el litoral, se pudo identificar a *Ulva fasciata* como una de estas. Esta alga fue denominada así por Delile en 1813 y es un sinónimo de *Ulva lactuca*, la cual fue nombrada por Linnaeus en 1753. Sobre *U. lactuca* se decía que provenía del norte de Europa, pero la información molecular indica que el espécimen holotipo de *U. lactuca*, probablemente, provino del Indo-Pacífico (Hughey et al., 2019). Cabe destacar que la *U. fasciata* no es una especie nativa de República Dominicana y, posiblemente, fue introducida de forma accidental. Por su parte, se dice que la *U. lactuca* pudo haber sido introducida accidentalmente en el Mediterráneo, en donde se informó la primera vez desde Alejandría, Egipto (Guiry & Guiry, 2020).

Especies del género *Ulva* tienen un gran potencial como bioindicador, debido a su amplia distribución geográfica y gran tamaño. Además, muchas especies del género *Ulva* se utilizan como biofiltros de nutrientes debido a su alta eficiencia en la eliminación de compuestos nitrogenados inorgánicos. Asimismo, son capaces de absorber y metabolizar diferentes formas de nitrógeno inorgánico, principalmente nitrato y amonio (Lee & Wang, 2001). El crecimiento de las especies del género *Ulva* tiene frecuencia en ambientes enriquecidos con nutrientes procedentes de ríos o zonas donde hay contaminantes albañales (Cano, 2008). *Ulva fasciata* puede crecer sin

ningún apego a sustrato y son capaces de proliferar cuando se les suministra agua de mar enriquecida con nutrientes, como los estuarios que se asocian con efluentes de aguas residuales; por lo tanto, se puede formar una gran masa de algas en áreas costeras, donde los niveles de nutrientes son muy altos (Cano, 2008).

La siguiente macroalga identificada tras la recolección fue *Chaetomorpha gracilis*. Sobre *Chaetomorpha* spp. hay investigaciones donde se mencionan ciertas especies de este género que acumulan concentraciones de cinc (Zn), arsénico (As), entre otros metales, en aguas contaminadas (De Arellano, 2007; González et al., 2011).

Kalesh y Nair (2005) estudiaron diversas algas marinas para ver los niveles de acumulación de metales pesados: níquel (Ni), cromo (Cr), estroncio (Sr) y plata (Ag), en la costa de Kerala, ubicada en India. Se estudiaron algunas algas de la división Chlorophyta (*Ulva lactuca*, *Enteromorpha intestinalis*, *Chaetomorpha antennina*) y otras de la división Rhodophyta. Se encontró que las concentraciones medias de Ni y Sr estaban dentro de los rangos reportados para las algas de la India, mientras que los contenidos de Cr eran considerablemente más altos que los valores reportados. Las Chlorophytas, *Enteromorpha intestinalis* y *Chaetomorpha antennina* estuvieron dentro de las algas que mostraron las mayores acumulaciones de Ni, Cr, Sr y Ag. *Ulva lactuca* exhibió la menor acumulación de Ni y Cr. Concluyeron que la *Chaetomorpha antennina* se puede utilizar para monitorear Sr y Cr en esa zona de estudio, mientras que la *Ulva lactuca*, al exhibir valores relativamente bajos de acumulación de metales, no se considera un buen indicador para este lugar.

En la investigación de Rai et al. (1981), se hizo una evaluación de la influencia de los metales pesados en algas, entre estas *Cladophora glomerata*, la cual es parte de la división Chlorophyta. Utilizando la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA), analizaron los metales pesados: plata (Ag), cromo (Cr), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), cinc (Zn) y manganeso (Mn). Conclusiones destacadas de su estudio fueron que los metales pesados son extremadamente tóxicos para las algas a concentraciones elevadas; que el umbral de toxicidad de un metal pesado varía en condiciones de campo y laboratorio, principalmente debido a la interacción con factores ambientales como el pH, calcio, fósforo, magnesio y dureza del agua.

En los estudios de Kumar et al. (2009), se pudo analizar la *Chaetomorpha* sp. y otras algas para ver su capacidad de biosorción. Los resultados obtenidos en este estudio indicaron que la mayor capacidad de adsorción para cadmio (Cd) y plomo (Pb) se observó en la *Chaetomorpha* sp., al compararse con otras cuatro especies de algas verdes. Concluyeron que la concentración de los metales pesados analizados durante el estudio disminuyó significativamente durante el período experimental, lo cual demostró que las macroalgas marinas son excelentes biosorbentes.

De los estudios previamente hechos por El Nemr et al. (2011) dentro de la bahía de Abu-Qir, localizada en el mar Mediterráneo, se pudo estudiar diversas concentraciones de metales en diferentes tipos de algas. Entre estas algas, estuvo la *U. fasciata*. Concluyeron que el contenido de metales de las especies de algas puede ser el resultado del estado estacionario entre la concentración de contaminación y la movilización del agua de mar, por igual, la disponibilidad de los metales y la capacidad de acumulación de las algas. Por esta razón, las algas estudiadas pueden considerarse indicadores potencialmente adecuados de los efectos de contaminación en lugares específicos y en corto plazo.

En los estudios de Pourkhabbaz et al. (2016), hechos en el río Karún de Irán, se evaluó la correlación entre los metales pesados en *Chaetomorpha* sp., y los encontrados en agua y sedimentos. Concluyeron que existe una correlación positiva y significativa entre las concentraciones de metales en los sedimentos de tejido de algas, y mostró que *Chaetomorpha* sp. es un bioindicador adecuado para metales pesados.

Ibrahim et al. (2016) investigaron la capacidad de biosorción utilizando la macroalga *Ulva lactuca* y su carbón activado. Observaron los efectos de varios parámetros como el tiempo de contacto, la dosis de algas, el efecto del pH y la concentración inicial de iones metálicos sobre el proceso de adsorción. Pudieron notar que la adsorción óptima ocurre a pH 5.0, en un tiempo de contacto de 60 min, una dosis de adsorbente 0.8 g/L y concentración inicial 60 mg/L. Concluyeron que *U. lactuca*, basada en carbón activado, se puede utilizar para la eliminación de iones metálicos del medio ambiente contaminado.

En la investigación de Shams et al. (2014), se evaluó como bioindicadores de metales pesados a algunas algas de Chlorophyta (*Enteromorpha compressa*

y *Ulva fasciata*), al igual que otras algas de las divisiones Phaeophyceae y Rhodophyceae. Concluyeron que *E. compressa* y dos algas más, que no son parte de la división Chlorophyta, obtuvieron los mayores valores de concentración de metales pesados estudiados durante el período 2008-2010.

Se encuentran dos investigaciones hechas en zonas costeras de República Dominicana, basadas en la utilización de macroalgas para la detección de metales pesados. En la investigación de Tejada et al. (2019) hecha en las playas La Caleta, Juan Dolio, San Andrés, Monte Río y La Saladilla, se pudieron analizar los metales: cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y cinc (Zn), en dos algas del género *Sargassum* (*Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*). El estudio demostró que las concentraciones se encontraban por debajo de los límites de aceptación. Se determinó que los valores de cobre eran relativamente más altos que los demás. En el estudio de Fernández et al. (2017) hecho en las playas Boca Chica, Guayacanes y Ojeda, se analizaron metales tóxicos como Hg, Pb, Cd, Ni y Cr; al igual, se buscó el contenido de otros 16 elementos utilizando las mismas especies de *Sargassum* mencionadas anteriormente. Se utilizó la técnica de espectrometría de masa por plasma acoplado inductivamente para determinar que no hubo niveles preocupantes de los elementos y que las algas estudiadas son capaces de bioacumular estos metales. Estas investigaciones afirman que la utilización de las macroalgas para la detección de metales pesados es factible.

Metodología

Localización y puntos de muestreo

Se tomaron cuatro puntos de muestreo del farallón, que van desde una playa cerca del Parque Carlos Gardel hasta una desembocadura de alcantarillado cerca del Colegio Dominicano de Periodistas. Ambos géneros (*Ulva* y *Chaetomorpha*) se encuentran en estos puntos acopladas a las rocas del farallón y, usualmente, muy cerca del nivel del agua de mar. La distancia entre cada uno de estos puntos varió entre 1.00 a 2.6 km.

El litoral sur de Santo Domingo es muy extenso y gran parte es un acantilado, debido a esto se tomaron cuatro puntos accesibles para las colectas de las muestras (véase Tabla 1). Se llegó a tomar en cada uno de los puntos sus coordenadas, para así estar claro de la distancia entre estos. Cada

punto fue nombrado como “PM” (PM = Punto de Muestreo), acompañado de un número asignado. En los puntos PM1 (véase Figura 2) y PM2 se tomaron muestras de *Chaetomorpha* sp. En los puntos PM3 (véase Figura 3) y PM4, se tomaron muestras de *Ulva* sp.

Tabla 1

Localizaciones de puntos de muestreos y sus coordenadas

Puntos de muestreo	Coordenadas
PM1: Playa cerca del Parque Carlos Gardel	18°28'04.3"N 69°53'20.6"W
PM2: Playa Güibía	18°27'33.1"N 69°54'19.1"W
PM3: Playa cerca del Banco Agrícola	18°27'17.4"N 69°55'00.7"W
PM4: Desembocadura de alcantarillado seco, cerca del Colegio Dominicano de Periodistas	18°26'53.5"N 69°55'21.9"W

Figura 1

Mapa de los puntos de muestreo



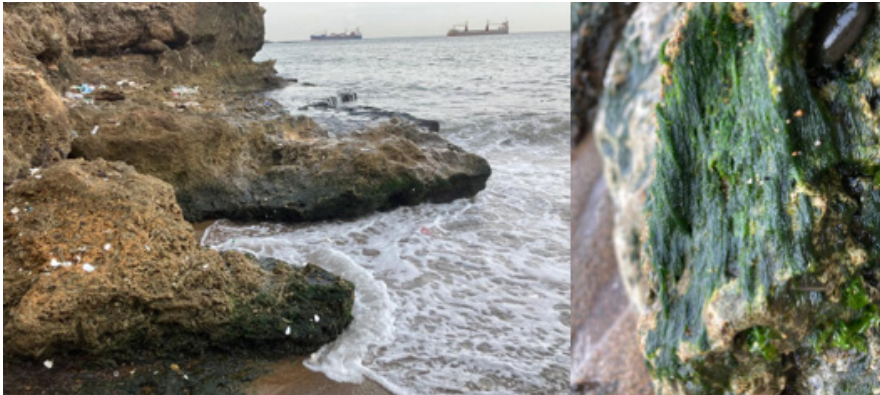
Nota. Google Earth.

En la recolección de muestras no se tomaron ambas especies de todos los puntos. En PM1 hay *Ulva fasciata* y *Chaetomorpha gracilis*, en PM2 solo se encontró *Chaetomorpha gracilis*, y en PM3 y PM4 solo se pudo observar *Ulva fasciata*. Se decidió recolectar en dos puntos una sola alga y en los otros dos puntos la otra especie. Esto se debió a que no había forma de

poder recolectar en más puntos, ya que el litoral sur es mayormente inaccesible para muestrear.

Figura 2

- a. Localización de donde se tomó *Chaetomorpha gracilis* en PM1 (a la izquierda)*
*b. Colonia de *Chaetomorpha gracilis* (a la derecha)*



Nota. Fotos E. Meléndez.

Figura 3

- a. Localización de donde se tomó *Ulva fasciata* en PM3 (a la izquierda)*
*b. Colonia de *Ulva fasciata* (a la derecha)*



Nota. Fotos E. Meléndez

Muestreo e identificación de las especies

El muestreo se realizó en la zona intermareal. La toma de muestras se llevó a cabo de forma manual. El tipo de muestra es biológica, ya que los organismos tomados son macroalgas. Se tomaron tres réplicas en cada uno de los cuatro puntos de muestreo. Cada muestra fue anotada con las coordenadas de donde se tomó y con su identificación única ya establecida. La determinación de las algas se realizó *in situ* para *Ulva fasciata* con base en la experiencia de campo del sustentante y el asesor. Para la otra especie de alga, nos auxiliamos de literatura taxonómica general y especializada, y de estudios comparativos con muestras de herbarios. De igual manera, para verificar ambas especies con exactitud, también acudimos a la asistencia del especialista Oniel Álvarez del Instituto de Investigaciones Botánicas y Zoológicas (IIBZ), de la Universidad Autónoma de Santo Domingo.

Las muestras obtenidas se introdujeron en recipientes cilíndricos con tapas ajustadas (véase Figura 4). Dentro de los recipientes, se colectaron alrededor de 5 gramos de cada alga para cada muestra y suficiente agua del lugar donde se tomaron, para preservarlas por más tiempo hasta su análisis. Cada muestra tomada en los puntos fue clasificada por su cercanía al mar (véase Tabla 2).

Figura 4

Muestras recolectadas y nombradas



Nota. Las de tapa roja son las muestras de *C. gracilis* y las de tapa blanca son las muestras de *U. fasciata*. Foto: E. Meléndez.

Tabla 2

División de las muestras según su localidad y su cercanía al mar

PM1.1	PM1.2	PM1.3	PM2.1	PM2.2	PM2.3	PM3.1	PM3.2	PM3.3	PM4.1	PM4.2	PM4.3
Lejos del mar	Cerca del mar	Medio	Lejos del mar	Cerca del mar	Medio	Lejos del mar	Cerca del mar	Medio	Lejos del mar	Cerca del mar	Medio

Para poder ver alguna relación entre las concentraciones de cada punto de muestreo, se tomaron las muestras de lugares diferentes dentro del mismo punto. Las muestras que están en azul corresponden a *C. gracilis*. Las muestras que están en naranja corresponden a *U. fasciata*. Las muestras que terminan en .1 son las que se tomaron más cercanas a la posplaya y las muestras que terminan en .2 son las que se tomaron más cercana a la anteplaya, y eran las muestras que se encontraban más secas. Las muestras que terminan en .3 son las que se tomaron entre la posplaya y la anteplaya.

Determinación de metales pesados

En República Dominicana no existen normativas para los límites de aceptación de metales pesados en algas, por lo que se utilizó la Tabla 3, la cual explica los valores certificados de los metales pesados en algas, hechos por el Instituto Nacional de Metrología de Japón (NMIJ), en la investigación de Narukawa et al. (2012).

Tabla 3

Valores certificados de los metales pesados analizados en alga, hecho por NMIJ

Metal	Valor certificado (mg/kg)
Cadmio (Cd)	0.79 ± 0.02
Cobre (Cu)	1.55 ± 0.07
Hierro (Fe)	311 ± 11
Níquel (Ni)	2.2 ± 0.1
Plomo (Pb)	0.43 ± 0.03
Cinc (Zn)	13.4 ± 0.5

Preparación de las muestras: lavado, secado, maceración, tamizado y digestión de las muestras

Se utilizó el protocolo de Tejada et al. (2019), que consistió en utilizar espectrofotometría de absorción atómica. Además de extraer del alga los metales por digestión ácida y someterlos por el capilar de succión y detectar los metales deseados (Ghrefat y Yusuf, 2006; Bettiol et al., 2008; Martínez y Sanz, 2009; Díaz et al., 2010).

Los análisis de las muestras fueron realizados en el laboratorio ALTOL Dominicana.

Análisis por la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica

Los metales analizados fueron cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni), plomo (Pb) y cinc (Zn). Los metales cadmio, cobre, níquel, plomo y cinc fueron elegidos ya que son metales tóxicos (Cuizano y Navarro, 2008; El-Naggar et al., 2018; Romera et al., 2007; Rybak et al., 2013), mientras que el hierro fue elegido debido a que este metal se encuentra frecuentemente en investigaciones de metales pesados en algas (Shams et al., 2014; Cano, 2008; Fernández et al., 2017; Cameron et al., 2018; Mehta y Gaur, 2005; Labib et al., 2014; Romera et al., 2007).

Curva de calibrado

La curva de calibración es un método de química analítica empleado para medir la concentración de una sustancia en una muestra, por comparación con una serie de elementos de concentración conocida (Rosas, 2014). Utilizando la Ley Fundamental de la Volumetría ($C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$), se calculó el volumen inicial del estándar utilizado según la concentración, de acuerdo con la metodología de Tejada et al. (2019).

Lectura de las muestras

El protocolo metodológico fue de acuerdo con el estándar del laboratorio ALTOL Dominicana. El equipo utilizado fue de la marca Agilent, modelo 240AA, número de serie MY1050003. Los metales analizados tienen rangos óptimos de operación a las longitudes de onda trabajadas, en las cuales fueron preparadas las curvas de calibración; estos valores se

pueden tomar como referencia a los mínimos detectables en el equipo (véase Tabla 4).

Tabla 4

Valores mínimos detectables por el equipo utilizado

Elemento	Rango óptimo de operación (µg/ml)
Cadmio	0.02 a 3
Cobre	0.03 a 10
Hierro	0.06 a 15
Níquel	0.1 a 20
Plomo	0.1 a 30
Cinc	0.01 a 2

Nota. ALTOL Dominicana.

Resultados

Análisis de las muestras por Espectroscopia de Absorción Atómica

A través de los resultados se destacó que las concentraciones de los metales cadmio (Cd), níquel (Ni) y plomo (Pb) no estuvieron en rangos permisibles para su detección por este método (véase Tabla 5).

Tabla 5

Concentración en mg/kg de metales pesados en las muestras de algas por cada punto de muestreo

Muestras	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
PM1.1	< 4.49	47.5101	2214.5581	< 22.43	< 22.43	133.2436
PM1.2	< 11.65	59.9068	2697.0862	< 58.28	< 58.28	132.0513
PM1.3	< 10.14	41.9371	2831.3387	< 50.70	< 50.70	137.3732
PM2.1	< 22.57	160.0451	3339.2777	< 112.87	< 112.87	84.9887
PM2.2	< 6.58	16.0303	1625.1152	< 32.92	< 32.92	27.9789
PM2.3	< 32.41	47.8120	1849.1086	< 162.07	< 162.07	69.6921
PM3.1	< 8.22	15.1316	241.1595	< 41.12	< 41.12	21.9984
PM3.2	< 5.67	15.1773	247.4326	< 28.37	< 28.37	22.5532
PM3.3	< 5.62	27.2702	56.0585	< 28.11	< 28.11	35.6480
PM4.1	< 5.80	21.2130	27.4811	< 29.02	< 29.02	22.1706
PM4.2	< 13.57	4.2741	20.5563	< 67.84	< 67.84	174.6947
PM4.3	< 22.08	< 33.11	25.2208	< 110.37	< 110.37	104.5254

Cobre. Entre los cuatro puntos de muestreo se obtuvo la concentración más alta del metal en la muestra PM2.1, con una concentración de 160.0451 mg/kg.

Hierro. Para el hierro, el segundo punto de muestreo obtuvo la concentración más alta del metal y fue en la muestra PM2.1 con una concentración 3339.2777 mg/kg.

Cinc. Entre los cuatro puntos de muestreo, el cuarto punto obtuvo la concentración más alta del metal y fue en la muestra PM4.2, con una concentración de 174.6947 mg/kg.

Chaetomorpha gracilis

Los puntos de recolección para *C. gracilis* fueron PM1 y PM2, en donde se obtuvieron los valores de concentración promedio más altos del estudio (véase Tabla 6).

Tabla 6

Concentraciones promedio (mg/kg) de cobre, hierro y cinc en PM1 y PM2*

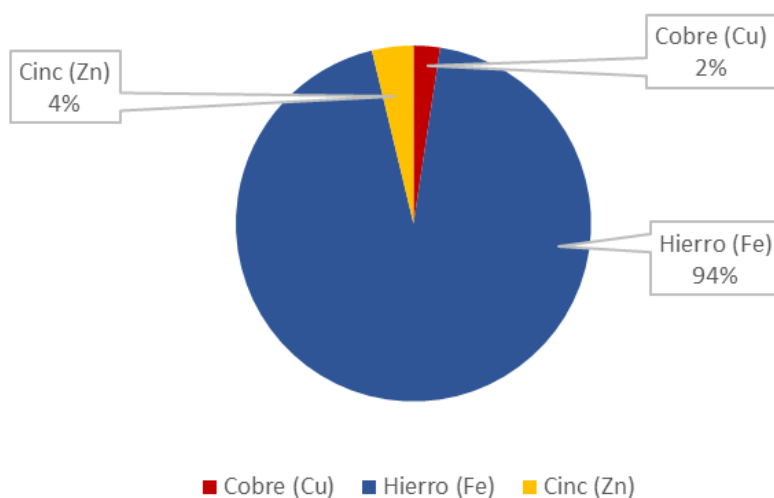
Metales	PM1 (mg/kg)	PM2 (mg/kg)
Cobre (Cu)	49.785	74.629
Hierro (Fe)	2580.994	2271.167
Cinc (Zn)	134.223	60.887

Nota. *Estos valores fueron redondeados a 3 decimales.

El metal con mayor presencia de los metales pesados detectados en el alga fue el hierro, estimándose a un 94 %, seguido del cinc con un 4 % y el cobre con un 2 % (véase Figura 5).

Figura 5

Comparación de la presencia de los metales pesados detectados en Chaetomorpha gracilis



Ulva fasciata

Los puntos de recolección para *U. fasciata* fueron PM3 y PM4, en donde se obtuvieron valores de concentración promedio más bajos del estudio (véase Tabla 7).

Tabla 7

Concentraciones promedio (mg/kg) de cobre, hierro y cinc en PM3 y PM4*

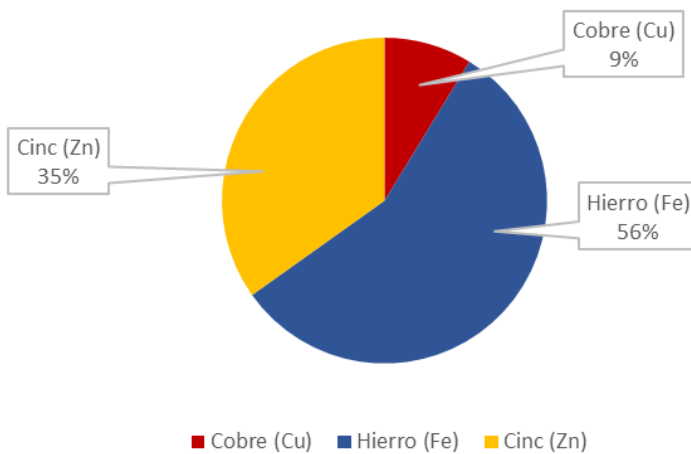
Metales	PM3 (mg/kg)	PM4 (mg/kg)
Cobre (Cu)	19.193	12.744
Hierro (Fe)	181.550	24.419
Cinc (Zn)	26.733	100.464

Nota. *Estos valores fueron redondeados a 3 decimales.

El metal con mayor presencia de los metales detectados en el alga fue el hierro, estimándose a un 56 %, seguido del Cinc con un 35 % y el cobre con un 9 % (véase Figura 6).

Figura 6

*Comparación de la presencia de los metales pesados detectados en *Ulva fasciata**

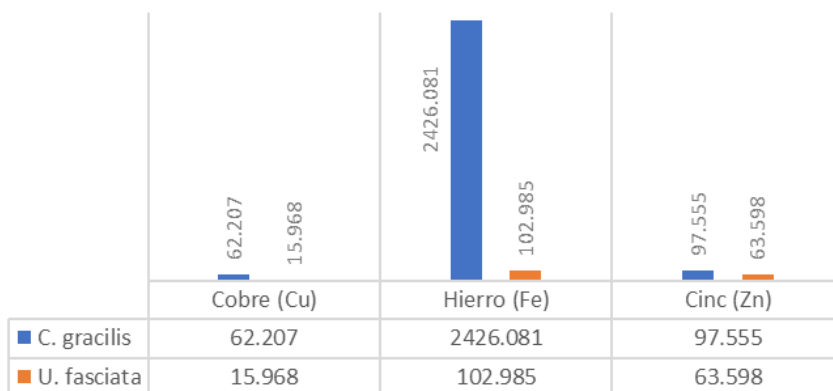


Variabilidad de las concentraciones promedio de U. fasciata y C. gracilis

Ulva fasciata y *Chaetomorpha gracilis* obtuvieron concentraciones promedio muy diferentes entre los metales analizados. *C. gracilis* obtuvo un mayor valor de concentración de metales pesados en todos los análisis (véase Figura 7).

Figura 7

Comparación de los valores de concentración promedio (mg/kg) entre U. fasciata y C. gracilis

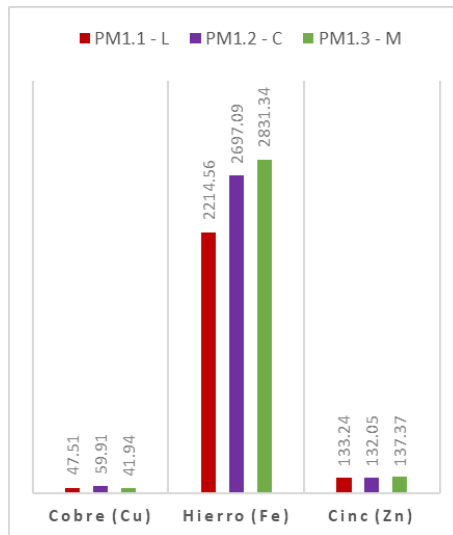


Variabilidad de las concentraciones por su cercanía al mar

Para verificar si existe una relación entre la cercanía al mar, donde se toma la muestra, y su concentración, se colectaron estas algas en diferentes distancias subjetivas: una muestra más cercana al mar, una muestra en un punto medio y una muestra más lejana al mar (véanse Figuras 8, 9, 10 y 11).

Figura 8

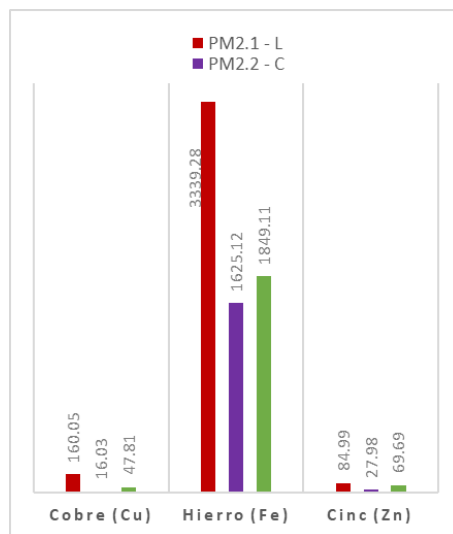
Valores de concentración (mg/kg) por su cercanía al mar en PM1



Nota. L = Lejos del mar; C = Cerca del mar; M = Punto medio.

Figura 9

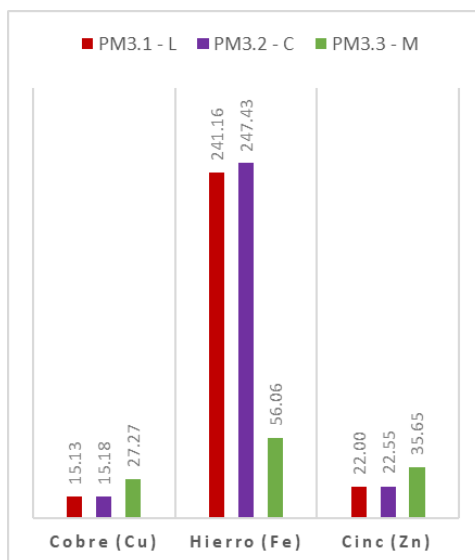
Valores de concentración (mg/kg) por su cercanía al mar en PM2



Nota. L = Lejos del mar; C = Cerca del mar; M = Punto medio.

Figura 10

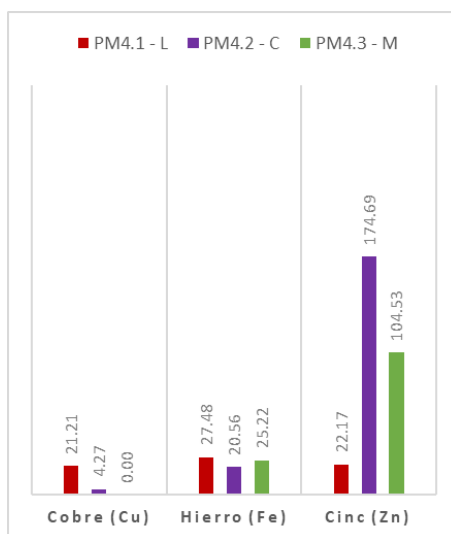
Valores de concentración (mg/kg) por su cercanía al mar en PM3



Nota. L = Lejos del mar; C = Cerca del mar; M = Punto medio.

Figura 11

Valores de concentración (mg/kg) por su cercanía al mar en PM4



Nota. L = Lejos del mar; C = Cerca del mar; M = Punto medio.

Comparación de las concentraciones de metales pesados del estudio con investigaciones nacionales

Los resultados obtenidos fueron comparados con investigaciones hechas en República Dominicana por Fernández et al. (2017) y Tejada et al. (2019), para así ver las variaciones de las concentraciones de los metales estudiados en diferentes géneros y especies de algas (véase Tabla 8).

Tabla 8

Concentraciones promedio de metales pesados en el presente estudio e investigaciones nacionales previas

Especies	Descripción	Concentración promedio de metales pesados (mg/kg)			Referencias
		Cu	Fe	Zn	
<i>Chaetomorpha gracilis</i>	Litoral sur de Santo Domingo, Rep. Dom.	62.207	2426.081	97.555	Estudio presente
<i>Ulva fasciata</i>	Litoral sur de Santo Domingo, Rep. Dom.	15.968	102.985	63.598	Estudio presente
<i>Sargassum</i> spp.	Playa Boca Chica, Rep. Dom.	8.703	655.348	20.640	Fernández et al., (2017)
<i>Sargassum</i> spp.	Playa Guayacanes, Rep. Dom.	11.860	287.182	12.742	Fernández et al., (2017)
<i>Sargassum</i> spp.	Playa Ojeda, Barahona, Rep. Dom.	1.649	20.087	15.662	Fernández et al., (2017)
<i>Sargassum natans</i>	Playa La Caleta, Rep. Dom.	27.958	–	45.600	Tejada, (2019)
<i>Sargassum fluitans</i>	Playa Juan Dolio, Rep. Dom.	18.715	–	20.725	Tejada, (2019)

Comparación de las concentraciones de metales pesados del estudio con investigaciones internacionales

Los resultados obtenidos fueron comparados con diversas especies de la división Chlorophyta, para así ver las variaciones de las concentraciones de metales en las algas estudiadas y en otras algas verdes, provenientes de investigaciones internacionales (véase Tabla 9).

Tabla 9

Concentraciones promedio en mg/kg de metales pesados en el presente estudio e investigaciones internacionales previas

Especies de Chlorophyta	Descripción	Concentraciones promedio (mg/kg)						Referencias y Técnica de detección
		Cd	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	
<i>Chaetomorpha gracilis</i>	Litoral sur de Santo Domingo, Rep. Dom.	–	62.207	2426.081	–	–	97.555	Estudio presente (EAA)
<i>Ulva fasciata</i>	Litoral sur de Santo Domingo, Rep. Dom.	–	15.968	102.985	–	–	63.598	Estudio presente (EAA)
<i>Chaetomorpha</i> sp.	Golfo de Kutch, India	20.408	–	–	–	37.037	–	Kumar et al., (2009) (EEA-PAI)
<i>Chaetomorpha</i> sp.	Río Karun, Irán	1.270	–	–	–	20.590	58.080	Pourkhabbaz et al., (2016) (EAA)
<i>Chaetomorpha antennina</i>	Costa de Kerala, India	–	–	–	8.890	–	–	Kalesh y Nair, (2005) (EAA)
<i>Ulva fasciata</i>	Jaimanitas, Playa Viriato y Playa Francesita, Cuba	2.240	23.070	1079.750	2.400	3.740	77.050	Cano, (2008) (EAA)
<i>Ulva fasciata</i>	Bahía de Abu Qir, Egipto	1.270	2.960	65.210	–	–	12.570	Shams et al., (2014) (EAA)
<i>Ulva lactuca</i>	Costa de Kerala, India	–	–	–	15.410	–	–	Kalesh y Nair, (2005) (EAA)
<i>Enteromorpha compressa</i>	Bahía de Abu Qir, Egipto	3.160	4.600	430.340	–	–	31.100	Shams et al., (2014) (EAA)
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	Costa de Kerala, India	–	–	–	15.040	–	–	Kalesh y Nair, (2005) (EAA)
<i>Cladophora glomerata</i>	“Deadman’s Bay”, Canadá	3.900	7.200	–	–	9.500	23.700	Rai, Gaur y Kumar (1981) (EAA)
<i>Cladophora glomerata</i>	Lago Ontario, Canadá	1.400	6.400	–	–	12.200	8.200	Rai, Gaur y Kumar (1981) (EAA)

Nota: EAA = Espectroscopia de Absorción Atómica; EEA-PAI = Espectroscopia de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente.

Discusión

Biosorción de metales pesados en algas

La capacidad de biosorción de metales pesados en algas son las interacciones fisicoquímicas entre los ligandos encontrados en la superficie celular y los iones metálicos presentes en el ambiente (Cuizano & Navarro, 2008). Según Navarro et al. (2007), la biosorción viene a través de la formación de complejos. En este estudio se dice que un complejo viene de la interacción de un ion metálico con orbitales de valencia vacíos (aceptor de electrones), con uno o varios ligandos con pares de electrones libres (dador de electrones). El metal se rodea de los ligandos formando un complejo. Esto explicaría la razón por lo cual los metales se mantienen adheridos a las algas. Navarro et al. (2007) explican que los ligandos que los metales pesados utilizan son aminoácidos y ácidos orgánicos, específicamente dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metalotioneinas, los cuales muestran gran afinidad por determinados grupos funcionales, como grupos sulfhidrilo, radicales amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo. Al final, estos ligandos son utilizados para crear complejos que tengan la facilidad de resistir la toxicidad del metal apegado.

Variabilidad de concentraciones promedio en las algas estudiadas

Se pudo observar una diferencia significativa entre las concentraciones promedio de metales pesados de las dos algas estudiadas. Una razón para esto podría ser que las algas tienen diferentes capacidades de adsorción. Esto podría llevar a pensar que la especie *Chaetomorpha gracilis* puede retener mayor cantidad de concentración de metales pesados en su superficie. Sin embargo, esto no es lo que se piensa, debido a que *C. gracilis* tiene menor área superficial en sus frondas para la retención de estos metales, comparándola a *Ulva fasciata*. Las frondas de *C. gracilis* son de menor tamaño, comparado a las de *U. fasciata*, por lo cual se espera ver menores valores de concentración de metales pesados (Quiroz et al., 2017). Se piensa que la verdadera razón no tiene que ver directamente con las capacidades de las algas, sino por una razón externa.

Se observó que el valor de concentración promedio del hierro en el presente estudio fue el más alto. El hierro es vital para la mayoría de los orga-

nismos vivos y, por esta razón, la mayoría de los organismos desarrollaron mecanismos específicos y de alta afinidad para adquirir este elemento. Cuando hay más hierro disponible, las células retienen más hasta llegar a un cierto límite (Botebol et al., 2014). Esto podría ser la razón del porqué los valores de concentración de hierro en *C. gracilis* fueron significativamente elevados, comparado a los demás metales estudiados.

Relación de la cercanía al mar y las concentraciones observadas

Se pudo determinar con las comparaciones de las figuras anteriores que, en este estudio, no existe una relación entre la cercanía al mar y las concentraciones observadas. Pensamos que se debe a dos posibles explicaciones:

- La primera explicación es que puede ser que estos metales pesados no estén acumulándose a través del mar. Esto significaría que los metales pueden estar en el suelo, en el aire o en la basura. En los puntos de muestreo PM1 y PM2 se vio una gran cantidad de basura alrededor de donde se encuentran estas algas. Aproximadamente, el 10 % de toda la basura en un lugar está compuesta de estos metales (García et al., 2002), lo cual explicaría por qué en los puntos se ve una diferencia en los valores de concentraciones de metales pesados observados.
- La segunda explicación es que esto se debe a que los lugares en donde se encuentran estas algas están los cambios de marea y oleaje. Para apoyar esta hipótesis, el oleaje de esta zona es un factor importante, ya que este suministra nutrientes y también participa en la eliminación de desechos. La fuerza ejercida por el oleaje puede ocasionar cambios en la composición de las poblaciones. Las olas, como agua en movimiento, también provocan un suministro continuo y la eliminación de factores ecológicamente significativos. Esto podría ocasionar tanto un aumento como una pérdida en las concentraciones de metales pesados, dependiendo de la fuerza del oleaje (Kingsbury, 1962).

El presente estudio y las investigaciones nacionales

Las concentraciones promedio del presente estudio fueron más altas para la *C. gracilis* que las algas estudiadas en las investigaciones hechas previamente en República Dominicana.

Si los metales pesados están acumulándose vía el mar, puede haber dos causantes para la elevada concentración encontrada en los puntos de *C. gracilis*:

- La primera causante sería que estos metales pudieran estar depositándose al mar a través del río Ozama, con base en los desechos industriales que son vertidos al río por las diferentes empresas que se encuentran en el margen de este (Mendoza, 1993; Contreras et al., 2004). Esto puede explicar por qué hay mayor concentración en los puntos más cercanos al río Ozama.
- La segunda razón sería que estos metales estén depositándose al mar a través de los alcantarillados cercanos. *C. gracilis* se encontró en dos puntos muy cercanos a los alcantarillados activos del litoral, por lo que se cree que esto podría estar aumentando la concentración de metales pesados en estas zonas.

El presente estudio y las investigaciones internacionales

Se pudo notar que las concentraciones promedio del presente estudio fueron mucho más para la *Chaetomorpha gracilis* que las que están en otras investigaciones, pero *Ulva fasciata* obtuvo valores similares a los demás estudios. Por igual, se pudo evidenciar en otros estudios que las especies de los géneros *Chaetomorpha* y *Ulva* sí pueden bioacumular todos los metales pesados analizados.

Para *Chaetomorpha gracilis* no se encontraron investigaciones de algas de este género que tuvieran los mismos metales estudiados y poder compararlos. A pesar de esto, se pudo encontrar investigaciones que sí mencionan la habilidad de adsorción para los metales no detectados: Kumar et al. (2009); Pourkhabbaz et al. (2016); Kalesh y Nair (2005). Para *Ulva fasciata*, los valores fueron muy diferentes a los encontrados en otros estudios. Sin embargo, la investigación de Cano (2008) nos brinda información útil para ver los valores de concentración de metales pesados en *U. fasciata*, ya que en esta investigación se obtuvieron valores para todos los metales analizados en el presente estudio. El valor de concentración del cobre fue el más cercano al valor obtenido de la investigación de Cano (2008).

Con base en los resultados de nuestra investigación, los géneros *Ulva* y *Chaetomorpha* pueden ser utilizados como un modelo para indicar contaminación ambiental por metales pesados. Esto coincide con las investigaciones realizadas por Haritonidis y Malea (1999), y Pourkhabbaz et al. (2016), en donde los géneros *Ulva* y *Chaetomorpha* han sido utilizados como bioindicadores de la contaminación por metales pesados.

En el presente estudio se observó que *Ulva fasciata* y *Chaetomorpha gracilis* son macroalgas representativas para la determinación de metales pesados utilizando la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica.

Conclusiones

Se observó, por la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica, la capacidad biosorción de los metales detectados en las Chlorophytas (*Chaetomorpha gracilis* y *Ulva fasciata*), para considerarlas indicadores de metales pesados. Partiendo de los resultados, la técnica por Espectroscopia de Absorción Atómica es un método factible para analizar metales pesados en algas.

Se determinó la presencia de los metales pesados: cobre (Cu), hierro (Fe) y cinc (Zn). Para *U. fasciata*, la concentración promedio de cobre fue de 15.968 mg/kg, de hierro fue de 102.985 mg/kg y para el cinc fue de 63.598 mg/kg. Para *C. gracilis*, la concentración promedio de cobre fue de 62.207 mg/kg, de hierro de 2426.081 mg/kg y para el cinc fue de 97.555 mg/kg, lo cual evidencia la importancia de la utilización de las Chlorophytas para la detección de metales pesados.

No se pudo establecer una relación entre la cercanía al mar y las concentraciones de metales pesados de las algas observadas en el litoral sur de Santo Domingo, República Dominicana, debido a patrones variables de marea y el oleaje.

Los resultados de los valores de concentración de cada metal analizado y detectado para la *Chaetomorpha gracilis* fueron significativamente mayores que los demás estudios nacionales e internacionales.

El problema de la contaminación en zonas costeras de la República Dominicana ha incrementado y afecta la funcionalidad de los ecosistemas costero-marinos. Los cambios bruscos en las relaciones tróficas, el incremento en nutrientes y los contaminantes químicos aportados por los procesos industriales son cada vez más incidentes.

Agradecimientos

Agradezco al INTEC y sus docentes. A la Vicerrectoría de Investigación de INTEC por facilitarme financiar los análisis de laboratorio dentro del marco del proyecto “Producción de carbón activado a partir de sargazo y estudio de su potencial para el tratamiento de efluentes”, financiado por FONDOCYT.

Le agradezco al Dr. Ricardo A. Martínez y al Ing. Augusto De Peña, por asistirme en la recolección de muestras.

Muchas gracias a ALTOL Dominicana, por sus servicios y esfuerzo en la elaboración de la metodología empleada en este trabajo, y a Oniel Álvarez del Instituto de Investigaciones Botánicas y Zoológicas (IIBZ) de la Universidad Autónoma de Santo Domingo, en la asistencia de la identificación a nivel de especie de las algas.

Referencias

- Aguilar-Rosas R., Aguilar-Rosas L. y Shimada, S. (2008). First Record of *Ulva pertusa* Kjellman (Ulvales, Chlorophyta) in the Pacific Coast of Mexico. *Algae*, 23, 201-207.
- Baamondes S., Fernández, I., Lozano R. y Ugarte, J. (2007). Is the cryptic alien seaweed *Ulva pertusa* (Ulvales, Chlorophyta) widely distributed along European Atlantic coasts? *Botánica Marina*, 50, 267-274.
- Betancourt, L. y Herrera-Moreno, A. (2001). Algas marinas bentónicas (Rhodophyta, Phaeophyta y Chlorophyta) conocidas para la Hispaniola. *Revista Moscosoa*, 12, 105-134
- Bettiol, C., Stievano, L., Bertelle, M., Delfino, F., y Argese, E. (2008). Evaluation of microwaves-assisted extraction procedures for the determination of metal content and potential bioavailability in sediments. *Applied Geochemistry*, 23, 1140-1151.

- Botebol, H., Sutak, R., Scheiber, I. F., Blaiseau, P. L., Bouget, F. Y., Camadro, J. M., y Lesuisse, E. (2014). Different iron sources to study the physiology and biochemistry of iron metabolism in marine micro-algae. *Biometals*, 27(1), 75-88.
- Cameron, H., Mata, M. T. y Riquelme, C. (2018). The effect of heavy metals on the viability of *Tetraselmis marina* AC16-MESO and an evaluation of the potential use of this microalga in bioremediation. *PeerJ*, 6, e5295.
- Cano Mallo, M. (2008). *Bases biológicas de Ulva fasciata Delile, (Chlorophyta) para su posible explotación, al oeste de la Habana, Cuba*. [Tesis de Doctorado, Universidad de la Habana (UH)]. <https://aquadocs.org/handle/1834/3404>.
- Chakraborty, S., Bhattacharya, T., Singh, G. y Maity, J. P. (2014). Benthic macroalgae as biological indicators of heavy metal pollution in the marine environments: A biomonitoring approach for pollution assessment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 100, 61-68.
- Chen, B. & Zou, D. (2015). Altered seawater salinity levels affected growth and photosynthesis of *Ulva fasciata* (Ulvales, Chlorophyta) germlings. *Acta Oceanológica Sinica*, 34, 108-113.
- Contreras Pérez, J. B., Mendoza Gómez, C. L., y Gómez, A. (2004). Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del Río Haina. *Ciencia y Sociedad*, 29(1) 38-71.
- Cuizano, N. A. y Navarro, A. E. (2008). Biosorción de metales pesados por algas marinas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 2, 120-125.
- De Arellano, G. A. V. R. (2007). *Utilización de microalgas para la remoción de Cadmio y Zinc en efluentes de aguas residuales urbanas*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- De Carvalho, C., Di Benedetto, A., Souza, C., Ramos, R. y Rezende, C. (2008). Heavy metal distribution in two cetacean species from Rio de Janeiro State, south-eastern Brazil. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 88(6), 1117-1120.
- Díaz, N. A., Ruiz, J. A. B., Reyes, E. F., Cejudo, A. G., Novo, J. J., Peinado, J. P., Melendez-Valdes, F. T. y Fiñana, I. T. (2010). *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Universidad de Córdoba, (pp. 1-8).

- Encinas, M. D. (2011). *Medio ambiente y contaminación, principios básicos*. Universidad del País Vasco, (pp. 1-119). <https://addi.ehu.es/handle/10810/16784>
- El-Naggar, N. E. A., Hamouda, R. A., Mousa, I. E., Abdel-Hamid, M. S., y Rabei, N. H. (2018). Statistical optimization for cadmium removal using *Ulva fasciata* biomass: Characterization, immobilization and application for almost-complete cadmium removal from aqueous solutions. *Scientific reports*, 8(1), 1-17.
- El Nemr, A., Khaled, A., y El-Sikaily, A. (2011). Heavy metal contamination in the seaweeds of Abu-Qir Bay, Egypt. *Blue Biotechnology Journal*, 1(2), 1-15.
- Escobar, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. Repositorio Cepal. <http://hdl.handle.net/11362/6411>
- Espinoza, J. (2005). Fenología de macroalgas marinas. *Hidrobiológica*, 1, 109-122.
- Fernández, F., Boluda, C. J., Olivera, J., Guillermo, L. A., Gómez, B., Echavarría, E. y 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.
- Gao, G., Zhong, Z., Zhou, X. y Xu., J. (2016). Changes in morphological plasticity of *Ulva prolifera* under different environmental conditions: A laboratory experiment. *Harmful Algae*, 59, 51-58.
- García, C., Moreno, J. L., Hernández Fernández, M. T. y Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 1, 125-138.
- Gautam, R., Sharma, S. y Chattopadhyaya, M. (2014). *Heavy metals in water: Presence, Removal and Safety*. The Royal Society of Chemistry.
- Ge, S., y Champagne, P. (2017). Cultivation of the marine macroalgae *Chaetomorpha linum* in municipal wastewater for nutrient recovery and biomass production. *Environmental science & technology*, 51(6), 3558-3566.
- Ghrefat, H., y Yusuf, N. (2006). Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan. *Chemosphere*, 65(11), 2114-2121.
- González, M. E. C., Sosa, L., Moreira, A. R., Maya, H., Pérez, S., León, A. R. y Gómez, M. (2011). Concentración de arsénico en macroalgas de la Bahía de Cienfuegos, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 26(1), 21-26.

- Guiry, M.D y Guiry, G.M. (2020). *Ulva fasciata* Delile 1813. *AlgaeBase*. National University of Ireland. <http://www.algaebase.org>.
- Haritonidis, S., y Malea, P. (1999). Bioaccumulation of metals by the green alga *Ulva rigida* from Thermaikos Gulf, Greece. *Environmental Pollution*, 104(3), 365-372.
- Hughey, J. R., Maggs, C. A., Mineur, F., Jarvis, C., Miller, K. A., Shabaka, S. H. y Gabrielson, P. W. (2019). Genetic analysis of the Linnaean *Ulva lactuca* (Ulvales, Chlorophyta) holotype and related type specimens reveals name misapplications, unexpected origins, and new synonymies. *Journal of phycology*, 55(3), 503-508.
- Ibrahim, W. M., Hassan, A. F. y Azab, Y. A. (2016). Biosorption of toxic heavy metals from aqueous solution by *Ulva lactuca* activated carbon. *Egyptian journal of basic and applied sciences*, 3(3), 241-249.
- Jayakumar, S. H. B., Saravanane, R. y Sundararajan, T. (2011). Biodeterioration of coastal concrete structures by macroalgae *Ulva fasciata*. *Journal of Marine Science and Technology*, 19(2), 154-161.
- Kalesh, N. S. y Nair, S. M. (2005). The accumulation levels of heavy metals (Ni, Cr, Sr, & Ag) in marine algae from southwest coast of India. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 87(2), 135-146.
- Kingsbury, J. M. (1962). The effect of waves on the composition of a population of attached marine algae. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 89(3), 143-160.
- Kumar, J. N., Oommen, C., y Kumar, R. N. (2009). Biosorption of heavy metals from aqueous solution by green marine macroalgae from Okha Port, Gulf of Kutch, India. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*, 6(3), 317-323.
- Kützing, F. T. (1845). *Phycologia germanica, di Deutschlands Algen in bündigen Beschreibungen. Nebst einer Anleitung zum Untersuchen und Bestimmen dieser Gewächse für Anfänger*. F. A. Brockhaus.
- Labib, W., El-Dahhar, A. y Diab, M. H. (2014). Biochemical Analyses of the green seaweed *Ulva fasciata* from Alexandria coastal environments. *Journal of the Arabian Aquaculture Society*, 10(2), 99-119.
- Lai, S. D., Chen, P. C. y Hsu, H. K. (2003). Benthic algae as monitors of heavy metals in various polluted rivers by energy dispersive X-ray spectrometer. *Journal of Environmental Science and Health*, 38(5), 855-866.

- Martínez, A. H., y Sanz, C. P. (2009). Metodologías de extracción de metales pesados presentes en matrices medioambientales marinas (*Posidonia oceánica*, sedimentos, anélidos poliquetos): Propuesta de una nueva metodología no contaminante. *Nereis: Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelización y Simulación*, 2, 65-72.
- Meenakshisundaram, G., Mairh, O. P., Karuppanan, E., y Subba Rao, P. Y. (1999). Effect of salinity, light intensity and nitrogen source on growth and composition of *Ulva fasciata* Delile (Chlorophyta, Ulvales). *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 28, 70-73.
- Mehta, S. K., y Gaur, J. P. (2005). Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: progress and prospects. *Critical reviews in biotechnology*, 25(3), 113-152.
- Lee, W. y Wang, W. (2001), Metal accumulation in the green macroalga *Ulva fasciata*: effects of nitrate, ammonium and phosphate, *Science of The Total Environment*, 278, 11-22.
- Mendoza De Cid, L. (1993). Determinación de elementos químicos en las aguas del río Ozama mediante la técnica de fluorescencia de rayos-X por reflexión total (TRXRF). *Revista Ciencia y Sociedad*, 16(1), 49.
- Narukawa, T., Inagaki, K., Zhu, Y., Kuroiwa, T., Narushima, I., Chiba, K. y Hioki, A. (2012). Preparation and certification of Hijiki reference material, NMIJ CRM 7405-a, from the edible marine algae hijiki (*Hizikia fusiforme*). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402(4), 1713-1722.
- Navarro-Aviñó, J. P., Alonso, I. A., y López-Moya, J. R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista Ecosistemas*, 16(2) <https://www.revistae-cosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>
- Nicolai, E. y Preston, R. D. (1952). Cell-wall studies in the Chlorophyceae. I. A general survey of submicroscopic structure in filamentous species. Proceedings of the Royal Society of London. *Series B-Biological Sciences*, 140(899), 244-274.
- Phillips, D. J. H. (1977). The use of biological indicator organisms to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments. A review. *Environmental Pollution*, 13, 281-317.
- Pourkhabbaz, H. R., Hedayatzadeh, F., y Cheraghi, M. (2016). Evaluation of the correlation between heavy metals in *Chaetomorpha* sp. and water and sediment in the pond drinking water treatment plants in karoon river area. *Journal of Oceanography*, 7(27), 69-78.

- Quiroz-González, N., León-Álvarez, D., y Rivas-Acuña, M. (2017). Nuevos registros de algas verdes marinas (Ulvophyceae) para Tabasco, México. *Acta Botánica Mexicana*, 118, 121-138.
- Rai, L. C., Gaur, J. P. y Kumar, H. D. (1981). Phycology and heavy-metal pollution. *Biological Reviews*, 56(2), 99-151.
- Romera, E., González, F., Ballester, A., Blázquez, M. L. y Muñoz, J. A. (2007). Comparative study of biosorption of heavy metals using different types of algae. *Bioresource technology*, 98(17), 3344-3353.
- Rosas, J. G. (2014). *Saberes matemáticos asociados a la curva de calibración en el análisis químico: Un caso* [Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional].
- Rybak, A., Messyasz, B. y Leska, B. (2013). The accumulation of metal (Co, Cr, Cu, Mn and Zn) in freshwater *Ulva* (Chlorophyta) and its habitat. *Ecotoxicology*, 22, 558-573.
- Tamayo, A. I. B., Guas, A. M. E., Leyte-Vidal, J. J. P., y Maccini, M. (2014). Analytical method for heavy metal determination in algae and turtle eggs from Guanahacabibes Protected Sea Park. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 4(4), 145-154.
- Shams El-Din, N. G., Mohamedein L. I. y El-Moselhy Kh. M. (2014). Seaweeds as bioindicators of heavy metals off a hot spot area on the Egyptian Mediterranean Coast during 2008-2010. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 5865-5881.
- Tejada-Tejada, P., Rodríguez-Rodríguez, Y., Rodríguez, L. E., Perdomo, O. P. y Boluda, C. J. (2019). Quantification of heavy metals in *Sargassum natans* and *Sargassum fluitans* arrived to the coasts of Dominican Republic during 2019. *Caribbean Science and Innovation Meeting*.
- Tsutsui, I., Kanjanaworakul, P., Srisapomee, P., Aue-umneoy, D. y Hamano, K. (2010). Growth of giant tiger prawn, *Penaeus monodon* Fabricius, under co-culture with a discarded filamentous seaweed, *Chaetomorpha ligustica* (Kützinger) Kützinger, at an aquarium-scale. *Aquaculture international*, 18(4), 545-553.
- Villares, R., Puente, X. y Carballeira, A. (2001). *Ulva* and *Enteromorpha* as Indicators of Heavy Metal Pollution. *Hydrobiologia*, 462, 221-232.
- Wichard, T., Charrier B., Mineur, F., Bothwell, J. H., De Clerck, O. y Coates, J. C. (2015). The green seaweed *Ulva*: a model system to study morphogenesis. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1-8.

- Zhang, J., Huo, Y., Yu, K., Chen, Q., He, Q., Han, W. y He, P. (2013a). Growth characteristics and reproductive capability of green tide algae in Rudong coast, China. *Journal of applied phycology*, 25(3), 795-803.
- Zhang, J. H., Huo, Y. Z., Zhang, Z. L., Yu, K. F., He, Q., Zhang, L. H., Yang, L. L., Xu, R. y He, P. M. (2013b). Variations of morphology and photosynthetic performances of *Ulva prolifera* during the whole green tide blooming process in the Yellow Sea. *Marine Environmental Research*, 92, 35-42.