

ECOLOGÍA Y APLICACIONES DE METABOLITOS SECUNDARIOS DE LOS GÉNEROS *Dictyota*, *Padina* Y *Sargassum* (PHAEOPHYTA)

ECOLOGY AND APPLICATION OF SECONDARY METABOLITES OF THE GENERA *Dictyota*, *Padina* AND *Sargassum* (PHAEOPHYTA)

Maira Alejandra Montes Lozano & Johana Paola Zuñiga Pichón

1. Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad de La Guajira, Colombia.
johazpn@gmail.com

Recibido: Octubre 17 de 2017 Aceptado: Enero 20 de 2018

RESUMEN

Las macroalgas pertenecientes a la división Phaeophyta presentan una gran importancia ecológica por ser partícipes en la estructuración de los ecosistemas, principalmente por la producción de metabolitos secundarios que pueden controlar su consumo por parte de herbívoros e incluso afectar otras especies de macroalgas competidoras con las que puedan cohabitar. La producción de este tipo de metabolitos ha sido la base tecnológica del ser humano en ámbitos como la medicina, alimentación y cosmética, aunque se han estudiado otros usos potenciales. Dentro de las macroalgas pardas, los géneros *Dictyota*, *Padina* y *Sargassum* son los más ricos en especies dentro del océano Atlántico occidental y mar Caribe, al igual que sus especies son unas de las más usadas por el ser humano. El presente trabajo es una revisión bibliográfica de la ecología, y aplicación actual o potencial de los metabolitos secundarios de estos géneros de Phaeophyta, con un enfoque que va desde la producción y efectos de estos en el medio natural, hasta los usos que se les ha dado y las investigaciones para su potencial aplicación biotecnológica e industrial.

Palabras clave: Macroalgas pardas, alelopatía, productos naturales, biotecnología algal.

ABSTRACT

The macroalgae belongs to division Phaeophyta presents an important ecological feature for being participants on the ecosystemic structuration, mainly by the secondary metabolites production that can control their consumption by the herbivores even affect other competitor macroalgae species with whom they cohabit. Production of this metabolites are the technological base of the human being in areas as medicine, food and cosmetic, even though other potential uses have been studied. Inside the brown macroalgae the genera *Dictyota*, *Padina* and *Sargassum* are the most richness in species inside the Atlantic Ocean and Caribbean Sea, just like they are some of the most used by the human being. The present work is a bibliographical review about the ecology and actual or potential application of secondary metabolites in this genera of Phaeophyta, with a focus that goes from the production and effects of they in the environment, until the uses that have been given and the research for its potential application in biotechnology and industry.

Key words: Brown macroalgae, allelopathy, natural products, algal biotechnology

1. INTRODUCCIÓN

Las Phaeophyta corresponden a un amplio grupo de algas marinas con una gran importancia ecológica, ya que estructuran el hábitat al que se encuentran asociadas, sobre todo en ecosistemas rocosos y someros de aguas templadas (Mansilla & Alveal 2013). Presentan los pigmentos clorofila a y c, así como beta-caroteno, por lo que su coloración varía de amarillo pardo a pardo oscuro, además que producen una gran cantidad de mucus protector (Meretta *et al.* 2012). Estas algas producen metabolitos secundarios, cuya clasificación química aborda principalmente terpenoides, polifenoles y acetogeninas, los cuales desempeñan variadas funciones ecológicas; destacando los diterpenos como los más comunes en este grupo de macroalgas (López Sánchez 2017, Chasqui *et al.* 2013, La Barre *et al.* 2010).

Según los perfiles metabólicos, existen significativas diferencias bioquímicas entre las divisiones de algas pardas (Phaeophyta), rojas (Rhodophyta) y verdes (Chlorophyta), revelando su divergencia evolutiva, además del potencial de cada grupo para producir sustancias de interés económico (Belghit *et al.* 2017). Dentro de las Phaeophyta se destacan tres géneros por su amplia riqueza de especies en la región Atlántico occidental, *Dictyota*, *Padina* y *Sargassum*, las cuales registran al menos 20, 10 y 39 especies, respectivamente (Díaz Pulido & Díaz 2003); por lo cual, se convierten en las macroalgas pardas más comunes, incluso en el Caribe, destacando que dichos géneros se consideran unos de los mayores productores de biomasa en zonas tropicales y subtropicales (Moreira *et al.* 2011); más importante es el hecho de que casi un tercio de la química conocida de las Phaeophyta parte del género *Dictyota*, con una amplia riqueza de terpenos (Maschek & Baker 2008).

Ya que el metabolismo secundario de las macroalgas pardas se basa en una biosíntesis, transformación y degradación de compuestos endógenos, su diversidad química deriva en una amplia lista de metabolitos (Ortega Maldonado 2012), cuyo ordenamiento es considerado estrictamente químico (González García *et al.* 2013), además que son agrupados en la categoría de productos naturales (Maschek & Baker 2008) por las diversas aplicaciones que les confiere el ser humano. Por lo anterior, las algas pardas contienen metabolitos secundarios que pueden servir para su aprovechamiento en la industria, los cuales deben ser aprovechados de manera eficiente, para que este recurso pueda generar no solo alternativas de empleo, sino desarrollo científico y económico para el mundo, sobre todo en los países en vías de desarrollo, como los latinoamericanos y del Caribe.

Considerando lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue realizar una revisión de las fuentes bibliográficas disponibles acerca de los aspectos ecológicos más relevantes, además de los usos y potencialidades de tres géneros de macroalgas pardas (*Dictyota*, *Padina* y *Sargassum*) que se caracterizan por su riqueza de especies en el Caribe y Atlántico Occidental (Díaz Pulido & Díaz 2003), lo que proporcionaría una visión de su importancia natural dentro de los ecosistemas, así como también de su potencial como recurso económico con aplicaciones industriales.

2. QUÍMICA BÁSICA DE METABOLITOS SECUNDARIOS EN PHAEOPHYTA

Las algas marinas son capaces de producir una gran variedad de metabolitos secundarios; de hecho, se reportan más de 1140 compuestos de este tipo para las Phaeophyta (Maschek & Baker 2008), destacando los géneros *Dictyota*, *Padina* y *Sargassum* como unos de los más empleados en el aislamiento de este tipo de compuestos químicos, que pueden ser utilizados de forma beneficiosa, para el desarrollo de biofármacos con una amplia aplicación medicinal, ya que son una fuente de aminoácidos, terpenos, florotaninos, esteroides, compuestos fenólicos, cetonas, alcanos halogenados y polisulfuros cíclicos (Patra *et al.* 2010).

El género *Sargassum* (13 tipos de metabolitos) muestra una diversidad más amplia de metabolitos secundarios según su clasificación química, en comparación con *Dictyota* (8 tipos de metabolitos) y *Padina* (6 tipos de metabolitos) (Tabla 1); sin embargo, *Dictyota* cuenta con una riqueza de más de 250 terpenos, lo cual representa alrededor del 33% de los metabolitos conocidos para las algas pardas (Maschek & Baker 2008), destacando que cuenta con 233 diterpenos aislados hasta finales del año 2017 (Chen *et al.* 2018). Es importante mencionar, que los florotaninos (polifenoles) son estructuras químicas que se encuentran exclusivamente en las algas pardas (Maschek & Baker 2008).

3. ASPECTOS ECOLÓGICOS

3.1. CONDICIONES AMBIENTALES Y METABOLITOS SECUNDARIOS

En general, las algas marinas tienen una importancia significativa en los ecosistemas donde se encuentran, ya que cumplen una función ecológica fundamental equilibrando los niveles de oxígeno en el agua, por medio de la fotosíntesis y participando en las redes tróficas; de hecho, estas llegan a producir grandes ecosistemas como el mar de los Sargazos (*Sargassum*), el cual presenta elevada biomasa de esta macroalga (Franks *et al.* 2016). La producción de metabolitos secundarios en las macroalgas es dependiente de interacciones ecológicas entre el medio abiótico, los herbívoros, epibiontes y competidores, con implicaciones evolutivas entre todos ellos (Pereira & Da Gama 2008).

Los metabolitos secundarios producidos por las algas se consideran una respuesta a presiones ecológicas, que generan defensa química para disuadir a los organismos herbívoros, competencia por el espacio, atracción de gametos y fecundación; además de controlar el establecimiento y crecimiento de bacterias y otros organismos que alteran su entorno (Blunt *et al.* 2016, Lozano 2012). Las algas marinas, especialmente las que viven en sustratos rocosos, están sometidas a condiciones a veces extremas (cambios bruscos de salinidad, variación en la irradiación, periodos de emersión por efecto de mareas, oleaje y depredadores); aun así, dicho sustrato les brinda una serie de minerales y un sustrato para fijarse, que en parte les permite adaptarse rápidamente a las nuevas circunstancias, por lo que existen cambios metabólicos que pueden producir mayor cantidad de metabolitos secundarios (Amsler 2008).

Cada tipo de costa (rocosa, arenosa, entre otras) influye en la diversidad y morfología de macroalgas (Ayala & Martín 2011); sin embargo, estas suelen presentarse principalmente en sustratos duros, como la piedra caliza, donde les es más fácil fijarse y crecer en sus huecos y grietas. Otros sustratos utilizados por las macroalgas para fijarse son la grava o el coral muerto, como es el caso de algunas especies como *Padina minor* (Santhanam *et al.* 2018). Por otro lado, existen especies del género *Sargassum* que no se fijan a ningún sustrato y son consideradas pelágicas (Franks *et al.* 2016, Makkar *et al.* 2016). Esta heterogeneidad ambiental juega un papel importante en el crecimiento de las macroalgas en general, creando condiciones diferentes que generan en ellas respuestas fisiológicas distintas, lo que desde un punto de vista evolutivo y ecológico explica cómo diferentes especies presentan diferentes tipos de metabolitos (Belghit *et al.* 2017).

Las condiciones ambientales son determinantes en la composición química de las macroalgas. *Sargassum vulgare* evidenció cambios en los niveles de azúcares, ácidos grasos, aminoácidos, antioxidantes y compuestos fenólicos, según las condiciones de acidificación del medio (pH), destacando que particularmente se registraron niveles más elevados de metabolitos secundarios en áreas más ácidas (< pH), mientras que los aminoácidos fueron más elevados en los sitios menos acidificados (> pH), sugiriendo que existen cambios metabólicos en función a las condiciones abióticas (Kumar *et al.* 2018). Por otra parte, en el archipiélago de Cabrera en el mar Mediterráneo, los extractos de *Padina pavonica* y *Dictyota dichotoma* han mostrado mayores niveles de toxicidad ambiental (según análisis Microtox[®] que emplea la bacteria *Vibrio fisheri*), por efecto estacional o temporal, siendo más tóxicos en noviembre con respecto a junio, lo que podría ser explicado por cambios en la tasa de crecimiento y mayor tamaño de estas especies (Martí *et al.* 2004).

Los metabolitos secundarios se derivan principalmente de los azúcares que se producen por medio de la fotosíntesis, generando los terpenos, mientras que por medio de otra ruta metabólica (acetil-coenzima a) se generan los florotanninos y los policétidos (acetogenina), que son los compuestos secundarios más comunes en las Phaeophyta; específicamente, los diterpenos dominan los metabolitos secundarios encontrados en el género *Dictyota*, destacando dyctiol, amijiol y dictyoxetano, entre una amplia variedad (Maschek & Baker 2008); mientras que *Sargassum* es rica en florotanninos (Li *et al.* 2017) y *Padina* presenta una gran variedad de compuestos policétidos (fenólicos) (Sudha & Balasundaram 2018). Estas moléculas se encuentran involucradas en la adaptación del organismo al ambiente o condiciones en las que se encuentre (Rico *et al.* 2017).

3.2. DEFENSA Y COMPETENCIA

A través del tiempo, la evolución se ha encargado de modificar la estructura externa e interna de los organismos vivos con el fin de adaptarse a una gran variedad de ecosistemas, permitiendo definir y seleccionar diversas estrategias de supervivencia, que abordan la defensa, ataque y comunicación con otros organismos; explicado en parte, por la amplia variabilidad de hábitats que les ha permitido desarrollar diversas rutas metabólicas secundarias, que producen una gran cantidad de compuestos químicos inusuales para adaptarse a sus estilos de vida; de esta manera, desde los niveles más bajos de la cadena trófica, la ecología química se ha establecido como una necesidad

para explicar las funciones que desempeñan estos compuestos en la supervivencia y estructura ecológica dentro de los ecosistemas (Amsler 2008).

La defensa química puede ser un factor antinutricional, definido como aquellas sustancias generadas por el metabolismo natural de algunas especies de macroalgas y que, por diferentes mecanismos, ejercen efectos contrarios a la nutrición óptima en los organismos que las consumen, de ahí que ocurra una disminución del metabolismo digestivo en ellos (Calvacanti *et al.* 2011).

Por otro lado, la palatabilidad es un factor importante para el consumo de las macroalgas, también influenciado ambientalmente; por ejemplo, la especie *Sargassum yezoense*, aunque no mostró correlación entre la palatabilidad y la temperatura, si se observó directamente correlacionada con el enriquecimiento de nutrientes, igualmente encontrando una correlación positiva entre la concentración de nitrógeno de la macroalga y la tasa de consumo del erizo *Hemicetrotus pulcherrimus* (Endo *et al.* 2015), lo que evidencia una dinámica entre el consumidor y la macroalga en función de cambios en la concentración de los compuestos químicos de esta última. Existe evidencia acerca de que la composición química de las macroalgas, puede afectar la ausencia o presencia de algunas especies de anfípodos herbívoros, por lo que estos se encuentran más asociados a ciertas especies de macroalgas, mientras que evitan o están ausentes en otras, destacando *Dictyota*, *Padina* y *Sargassum* como los géneros con mayor evidencia de inhibición de herbívoros; como se ha observado en *Dictyota menstrualis*, cuyos extractos han inhibido la actividad de anfípodos, que no suelen encontrarse asociados a esta especie, lo cual explica su ausencia en muestras de esta macroalga (Sotka & Whalen 2008).

Las algas marinas producen diferentes metabolitos secundarios con bioactividad específica (Dahms & Dobretsov 2017, Maschek & Baker 2008), cuya principal consecuencia es la defensa por aleopatía (inhibición química hacia otros organismos), lo que en la mayoría de los casos resulta favoreciendo las macroalgas que producen estos compuestos (Pereira & Da Gama 2008); no obstante, existe un tipo de defensa asociativo, que ocurre cuando una especie se protege del consumo por herbívoros mediante la asociación con otra especie a manera de refugio, tal es el caso de especies palatables como *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyta) que se asocian (como epibionte) con una no palatable como *Sargassum filipendula*, evitando así su consumo por parte del erizo de mar *Arbacia punctulata*; asimismo, se ha reportado un fenómeno similar, por la asociación entre *Sargassum* y *Dictyota* en el mar de Brasil, aunque *Sargassum* crece en las zona meso y sublitoral, algunas veces es colonizada por *Dictyota*, por lo que esta última es menormente consumida por el erizo *Lytechinus variegatus*, el cual consume en mayor medida a *Sargassum* (Pereira & Da Gama 2008).

Los efectos descritos anteriormente no se limitan a la defensa, sino que también derivan en la exclusión competitiva con otros organismos; de hecho, el consumo selectivo de macroalgas palatables por peces herbívoros, puede remover potenciales competidores y favorecer el establecimiento o proliferación de especies de macroalgas no palatables o con defensa química (Pereira & Da Gamba 2008).

En otro orden de ideas, las especies *Dictyota pulchella* y *Dictyota pinnatifida* inhiben el desarrollo larvario del coral *Porites astreoides*, afectando el reclutamiento de éste en los ecosistemas donde coexisten, por lo que estas macroalgas pueden ser dominantes en

arrecifes degradados por su efecto inhibitorio (alelopático), desplazando así al coral en la competencia por el espacio (Paul *et al.* 2011). Las interacciones bióticas de macroalgas no sólo incluyen defensa a la herbivoría y competencia, sino además relaciones predador-presa en varios niveles tróficos; lo que permite inferir que a lo largo de la evolución estos organismos han desarrollado características adaptativas propias, las cuales favorecen el crecimiento y desarrollo de toda la comunidad (Ibarra Basurto 2015).

La inhibición de epibiontes y competidores por acción de metabolitos secundarios de macroalgas, antes de la fase de fijación de estos, es considerado una fuerza selectiva con una intensidad equivalente a la defensa química ante la herbivoría (Pereira & Da Gamma 2008). La competencia por espacio es muy intensa en organismos bentónicos; algas pardas como *Fucus gardneri* son inhibidas por las propiedades tóxicas de otras macroalgas verdes del género *Ulva*; sin embargo, algas pardas como *Pilayella littoralis* reduce la germinación de los cigotos de *Fucus vesiculosus*, evidenciando que una baja concentración de exudados de *P. littoralis* reduce la tasa de fijación de *F. vesiculosus* (Jormalainen & Honkanen 2008).

En base a las características defensivas y competitivas de los organismos, la búsqueda de moléculas con aplicación biomédica centra su atención en organismos blandos, de colores llamativos, y que sean sésiles o de movimientos lentos, lo que usualmente indica la presencia de sustancias químicas usadas como método de defensa contra sus depredadores o competidores, que presuponen la presencia de compuestos bioactivos (Gómez Luna 2017).

4. APLICACIONES Y POTENCIALIDADES

4.1. MEDICINA-SALUD

Las macroalgas marinas exhiben una variedad de moléculas con características estructurales y químicas únicas; es decir, dichas moléculas son únicas de este tipo de organismos y contienen un alto potencial de aprovechamiento en múltiples industrias (Máximo *et al.* 2018). En los últimos años, los productos naturales de origen marino han adquirido mayor relevancia en el sector farmacéutico, debido al descubrimiento de nuevos agentes terapéuticos, para combatir múltiples enfermedades que afectan al ser humano (Morales *et al.* 2014).

Las propiedades farmacológicas y médicas de los extractos de especies marinas hacen de éstas una fuente potencial de fármacos y un campo abierto a la investigación en la farmacognosia (Moreira *et al.* 2011), para mediante el aislamiento e identificación de compuestos bioactivos poder producir medicamentos. En una amplia revisión de literatura acerca de productos naturales marinos publicados durante el año 2017, en la sección de algas pardas se mencionan cinco especies, de las cuales dos son pertenecientes al género *Sargassum* (*S. wightii* y *S. thunbergii*) y una al género *Padina* (*P. boergesenii*) (Carroll *et al.* 2019), lo que pone en perspectiva el potencial de estos géneros como fuente de compuestos de uso medicinal, así como son cada vez más comunes los reportes de nuevos fármacos a partir de los mismos.

Desde hace varias décadas, las algas han sido reconocidas como una de las fuentes más ricas de nuevos compuestos bioactivos, descubriéndose en algunos casos estructuras moleculares únicas que manifiestan actividad antibacteriana, anticancerígena, cardiotónica, antiviral, antitumoral, antiinflamatoria, anticoagulante, entre otras (Blunt *et al.* 2016); de hecho, se siguen descubriendo nuevos compuestos, como el ácido padinólico (triterpeno), aislado a partir de *P. boergesenii*, el cual mostró entre una baja y moderada inhibición de enzimas como la α -glucosidasa y ureasa, respectivamente, así como moderada actividad de peroxidación antilipídica, que pueden emplearse como tratamiento contra la diabetes por medio del bloqueo o reducción de la absorción de glucosa por medio de la inhibición de enzimas como la α -glucosidasa (Ali *et al.* 2017). Por otra parte, los extractos acuosos de *P. minor* han presentado actividad antioxidante y gastroprotectora (Santhanam *et al.* 2018).

En *Sargassum carpophyllum* se han aislado metabolitos como el fucosterol y 24-etilcolesta-4, con actividad citotóxica para varios tipos de cáncer (mama, leucemia, hueso y próstata), destacando que varias de las especies de este género presentan una diversidad de metabolitos secundarios con amplios efectos medicinales antiinflamatorios (quinonas de *S. sagamium*), antioxidantes (quinonas de *S. elegans*), antidepresivos y anticonvulsivos (fucosterol de *S. fusiforme*), entre otros (Máximo *et al.*, 2018; Pramitha & Sree Kumari 2016). Asimismo, se han aislado los compuestos indol-2-carboxialdehído e indol-5-carboxiladehído a partir de *S. thunbergii*, mostrando actividad inhibitoria de la adipogénesis, lo que los convierte en compuestos candidatos para combatir la obesidad (Kang *et al.* 2017). Se ha reportado que los extractos de *Sargassum muticum* presentan actividad contra el cáncer de seno, correlacionándose directamente ésta con el contenido de polifenoles, además de presentar actividad antimicrobiana contra bacterias como *Shigella fleshneri*, *Micrococcus* sp. y *Salmonella paratyphi* B (Santhanam *et al.* 2018, Namvar *et al.* 2013).

Por otra parte, los extractos de *Dictyota pfaffi* han mostrado inhibición a la actividad hemolítica del veneno de la oruga *Lonomia obliqua*, por lo que esta macroalga puede emplearse para el desarrollo de antídotos contra este tipo de veneno (Domingos *et al.* 2009), aunque no se encontró en la literatura el aislamiento de los compuestos bioactivos que provocan dicho efecto inhibitorio.

4.2. ALIMENTACIÓN

En general, las algas pardas son ricas en minerales, presentan cantidades bajas a moderadas de proteínas, y algunas especies se han empleado como alimento para humanos, ya sea de manera directa o indirecta, en vista de que han sido usadas en la alimentación de ganado (rumiantes); principalmente, el género *Sargassum* se aprovecha como alimento por su amplia distribución mundial, ya que este puede ser encontrado en zonas templadas, subtropicales y tropicales. Algunas especies como *S. muticum* pueden formar láminas de hasta 16 metros de largo; otras especies como *S. fusiforme* y *S. thunbergii* son de consumo humano, incluso bajo cultivo en países asiáticos (Carroll *et al.* 2019, Makkar *et al.* 2016).

Las algas pardas por su alto contenido de carbohidratos, metabolitos bioactivos con diversas funciones farmacológicas, además de alginas, carrageninas y agar (ampliamente usadas para estabilizar alimentos), las convierte en un recurso importante

para ser empleado como alimento funcional, destacando el género *Sargassum* como de alto valor a este respecto (Freitas *et al.* 2012).

Por otra parte, se reporta el consumo como alimento humano de las especies *Sargassum fluitans*, *Sargassum natans*, *Sargassum polycarpum*, *S. vulgare*, *Dictyota ciliolata*, *Dictyota stolonifera*, *Padina crispata* y *Padina durvillei* (Santhanam *et al.* 2018). Por esta razón, se destaca que en general las macroalgas pardas pueden contener altas concentraciones de elementos peligrosos como metales pesados, así como son ricas en yodo, lo cual puede causar envenenamiento por periodos prolongados de consumo; de hecho, *S. fusiforme* ha presentado altas concentraciones de arsénico, lo cual ha sido señalado por autoridades competentes en materia de alimentación de la comunidad europea (Makkar *et al.* 2016).

4.3. COSMÉTICA

Desde el punto de vista cosmético, se ha sugerido el uso de *P. pavonica*, ya que sus extractos presentan actividad que inhibe la enzima hialuronidasa, la cual degrada el ácido hialurónico y está asociada con el envejecimiento de la piel; sin embargo, aún queda por aislar e identificar las moléculas activas que definen esta acción (Fayad *et al.* 2017). Otra especie con potencial uso en esta y otra área es *Padina gymnospora*, cuya extracción de nanopartículas metálicas (oro, plata y platino) puede ser empleada en la elaboración de productos como champú, jabones y detergentes, como es usual en el desarrollo de los mismos (Singh *et al.* 2013).

Por su parte, los géneros *Sargassum* y *Dictyota* no presentan este tipo de usos actualmente, aunque varias especies (*S. muticum*, *S. vulgare*, *D. fasciada*, *D. implexa* y *D. ciliolata*,) presentan actividad antioxidante (Pereira 2015), la cual es una característica importante en el área cosmética (Bueno Ariede *et al.* 2017).

4.4. BIOCOMBUSTIBLES

Las algas verdes, rojas y pardas producen etanol por fermentación; aunque, son estas últimas las sugeridas como materia prima para producción de bioetanol por su mayor contenido de carbohidratos, así como también su amplia facilidad para ser cultivadas en masa; no obstante, las macroalgas muestran un uso potencial para este tipo de uso, mas no se encuentran actualmente explotadas con dicho fin (Milledge *et al.* 2014).

Se ha evidenciado que varias especies del género *Sargassum* presentan un potencial como materia prima para la producción de bioetanol (Borines *et al.* 2013), así como también la especie *Padina tetrastromatica* presenta un alto potencial tanto para la producción de bioetanol como también de biodiesel (Ashokkumar *et al.* 2017); del mismo modo, se destaca el género *Dictyota*, ya que es el que contiene mayor cantidad de lípidos, con una variación de 71-202 mg/g de peso seco del alga, lo cual es un factor importante en la materia prima para la producción de biodiesel comercial (Suutari *et al.* 2015).

4.5. OTROS USOS

Aunque se sugiere el uso potencial de *S. muticum* como fertilizante, por su alto contenido de nitrógeno, fósforo, potasio y mineral (Milledge *et al.* 2016), otras macroalgas son empleadas actualmente con este fin como *D. dichotoma*, cuyos extractos se emplean como fertilizante líquido (Pereira 2015). Por su parte, los extractos enriquecidos con polisacáridos de *P. gymnospora* promueven la germinación y estimulan el crecimiento de semillas de tomate y soya verde, por lo que puede ser una fuente algal de bajo costo, para ser empleada en la agricultura orgánica de estas plantas (Hernández-Herrera *et al.* 2016).

La especie *S. muticum* presenta otros usos potenciales como insecticida, contra organismos incrustantes y para el tratamiento de aguas servidas, lo que refleja los posibles usos que se les puede dar a las macroalgas en general. Igualmente *D. dichotoma* presenta propiedades larvicidas (mosquitos) (Pereira 2015), que le confieren un potencial uso como insecticida. También se han estudiados los extractos de *S. wightii* y *P. pavonica* como insecticidas, específicamente sobre el hemíptero *Dysdercus cingulatus* (considerado una plaga para los cultivos de algodón), ya que mostraron un efecto mortal en las ninfas como también en los huevos del insecto, por lo que se sugiere su uso para el manejo de cultivos (Asharaja & Sahayaraj 2013, Sahayaraj & Kalidas 2011). Por otra parte, extractos de *Dictyota bartayresiana* presentan una elevada actividad antilarval contra el díptero *Culex quinquefasciatus*, el cual es un mosquito considerado vector de enfermedades a nivel tropical y subtropical, por lo cual se propone como agente de control contra este vector de enfermedades como la malaria (Alias *et al.* 2015).

5. CONCLUSIONES

Esta revisión demuestra que los géneros *Dictyota*, *Padina* y *Sargassum* producen una variedad de metabolitos secundarios de diferente naturaleza química (principalmente terpenos), que les ofrecen funciones ecológicas asociadas principalmente a la supervivencia de las mismas dentro de sus entornos; además la bioactividad de estos compuestos les confiere un uso por parte del ser humano, que aborda áreas como la medicina y alimentación, aunque con potencialidad para otras como los biocombustibles. El género más representativo es *Dictyota*, por su riqueza de metabolitos secundarios bajo la clasificación química de terpenoides. Aun cuando existen reportes sobre el aislamiento e identificación de los metabolitos secundarios y su bioactividad, existe un vacío sobre los compuestos que confieren la bioacción particular observada cuando se emplean extractos de estas macroalgas, lo que sin duda es un objetivo que se alcanzará con el desarrollo de este tipo de estudios a futuro.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali L., A. Khan, M. Al-Broumi, R. Al-Harrasi, L. Al-Kharusi, J. Hussain & A. Al-Harrasi. 2017. New Enzyme-Inhibitory Triterpenoid from Marine Macro Brown Alga *Padina boergesenii* Allender & Kraft. *Marine drugs*, 15: 1–8. <https://doi.org/10.3390/md15010019>.
- Alias J., K. Velayutham, N. Mani, S. Thangaiah & R. Irullappan. 2015. Antibacterial, cytotoxic and larvicidal potential of *Dictyota bartayresiana* Lamour. *Journal of Coastal Life Medicine* 3: 352–355. <https://doi.org/10.12980/JCLM.3.2015JCLM-2014-0092>
- Amsler C. D. 2008. *Algal chemical ecology*. Springer, Germany, 313 pp.

- Asharaja A. & K. Sahayaraj. 2013. Screening of insecticidal activity of brown macroalgal extracts against *Dysdercus cingulatus* (Fab.) (Hemiptera: Pyrrhocoridae). *Journal of Biopesticides*, 6: 193–203.
- Ashokkumar V., M. R. Salim, Z. Salam, P. Sivakumar, C. T. Chong, S. Elumalai, V. Suresh & F. N. Ani. 2017. Production of liquid biofuels (biodiesel and bioethanol) from brown marine macroalgae *Padina tetrastromatica*. *Energy conversion and management*, 135: 351–361.
- Ayala Y. & A. Martín. 2011. Relaciones entre la comunidad de anfípodos y las macroalgas a las que están asociados, en una plataforma rocosa del litoral central de Venezuela. *Boletín. Instituto Español de Oceanografía*, 19: 171–182.
- Belghit I., J. D. Rasinger, S. Heesch, I. Biancarosa, N. Liland, B. Torstensen, R. Waagbø, E.-J. Lock & C. G. Bruckner. 2017. In-depth metabolic profiling of marine macroalgae confirms strong biochemical differences between brown, red and green algae. *Algal Research*, 26: 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.08.001>
- Bianco É. M., V. Laneuville Teixeira & R. Crespo Pereira. 2010. Chemical defenses of the tropical marine seaweed *Canistrocarpus cervicornis* against herbivory by sea urchin. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58: 213–218. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592010000300004>.
- Blunt J., B. Coop, M. Munro, P. Northcothe & M. Prinsep. 2016. Marine natural product. *Journal of Natural Products*, 23: 26–78.
- Borines M. G., R. L. de León & J. L. Cuello. 2013. Bioethanol production from the macroalgae *Sargassum* spp. *Bioresource technology*, 138: 22–29.
- Bueno Ariede M., T. Marcílio Candido, A. L. Morocho Jacome, M. V. Robles Velasco, J. C. de Carvalho & A. Rolim Baby. 2017. Cosmetic attributes of algae-A review. *Algal research*, 25: 483–487.
- Calvacanti D., M. Vasconcelos, A. Pinto, C. Morales, R. Crespo & V. Laneuville. 2011. Effects of storage and solvent type in a lipophilic chemical profile of the seaweed *Dictyota menstrualis*. *Brazilian journal of Oceanography*, 56: 51–57.
- Carroll A. R., B. A. Copp, R. A. Davis, R. R. Keyzers & M. Prinsep. 2019. Marine natural products. *Natural Product Reports*, 36: 122–173. <https://doi.org/10.1039/C8NP00092A>.
- Chasqui L., N. Ramón, A. Rodríguez-Rincón, D. Gil-Agudelo. 2013. Ambientes marinos de la plataforma somera de la Guajira, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR*, 42: 401–412.
- Chen J., H. Li, Z. Zhao, X. Xia, B. Li, J. Zhang & X. Yan. 2018. Diterpenes from the marine algae of the genus *Dictyota*. *Marine drugs*, 16: 1–25. <https://doi.org/10.3390/md16050159>
- Dahms H. & S. Dobretsov. 2017. Antifouling compounds from marine macroalgae. *Marine drugs*, 15: 1–16.
- Díaz Pulido G. & M. Díaz. 2003. Diversity of benthic marine algae of the Colombian Atlantic. *Biota colombiana*, 42: 203–246.
- Domingos T. F., C. Carvalho, L. de A. Moura, V. L. Teixeira, R. C. Pereira, É. Bianco, W. J. Ferreira, C. J. Ramos, A. L. de Miranda, P. A. Melo, J. A. Guimarães & A. L. Fuly. 2009. Antilimonomic effects of Brazilian brown seaweed extracts. *Natural Product Communications*, 4: 1075–1078.
- Endo H., K. Suehiro, J. Kinoshita & Y. Agatsuma. 2015. Combined Effects of Temperature and Nutrient Enrichment on Palatability of the Brown Alga *Sargassum yezoense* (Yamada) Yoshida & T. Konno. *American Journal of Plant Sciences*, 6: 275–282. <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.62031>.
- Fayad S., R. Nehmé, M. Tannoury, E. Lesellier, C. Pichon & P. Morin. 2017. Macroalga *Padina pavonica* water extracts obtained by pressurized liquid extraction and microwave-assisted extraction inhibit hyaluronidase activity as shown by capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 1497: 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.03.033>.
- Franks J. S., D. R. Johnson & D.S. Ko. 2016. Pelagic *Sargassum* in the Tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*, 27: SC6-SC11. <https://doi.org/10.18785/gcr.2701.08>
- Freitas A. C., D. Rodrigues, T. A. Rocha-Santos, A. M. Gomes & A. C. Duarte. 2012. Marine biotechnology advances towards applications in new functional foods. *Biotechnology Advances*, 30: 1506–1515. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.03.006>.
- González Giro Z., M. Fuentes Reyes, P. Batista Corbal, A. Campos Castro & Y. Vera Pérez. 2015. Análisis fitoquímico preliminar de dos extractos del alga *Padina gymnospora*. *Biotechnia*, 17: 26–29. <https://doi.org/10.18633/bt.v17i2.176>
- Gómez Luna L. 2017. Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, 19: 3–20.
- González García Y., M. Contreras, J. Carlos, O. Gonzales & J. Cordova. 2013. Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29: 77–115.

- Hernández-Herrera R.M., F. Santacruz-Ruvalcaba, J. Zañudo-Hernández & G. Hernández-Carmona. 2016. Activity of seaweed extracts and polysaccharide-enriched extracts from *Ulva lactuca* and *Padina gymnospora* as growth promoters of tomato and mung bean plants. *Journal of Applied Phycology*, 28: 2549–2560. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0781-4>.
- Ibarra Basurto A. 2015. Variabilidad temporal en la estructura y composición de la macrofauna bentónica en playa Atenas, Pisco. Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Jormalainen V. & T. Honkanen. 2008. Macroalgal chemical defenses and their roles in structuring temperate marine communities, pp. 57–89. En: Amsler C. D. (Ed). *Algal Chemical Ecology*. Springer, Germany.
- Kang M.-C., Y. Ding, E.-A. Kim, Y. K. Choi, T. De Araujo, S.-J. Heo & S.-H. Lee. 2017. Indole derivatives isolated from brown alga *Sargassum thunbergii* inhibit adipogenesis through AMPK activation in 3T3-L1 preadipocytes. *Marine drugs*, 15: 1–10. <https://doi.org/10.3390/md15040119>.
- Kumar A., H. Abdelgawad, I. Castellano, S. Selim, G. T. Beemster, H. Asard, M. C. Buia & A. Palumbo. 2018. Effects of ocean acidification on the levels of primary and secondary metabolites in the brown macroalga *Sargassum vulgare* at different time scales. *Science of the Total Environment*, 643: 946–956.
- La Barre S., P. Potin, C. Leblanc & L. Delage. 2010. The halogenated metabolism of brown algae (Phaeophyta), its biological importance and its environmental significance. *Marine drugs*, 8: 988–1010.
- Li Y., X. Fu, D. Duan, X. Liu, J. Xu & X. Gao. 2017. Extraction and Identification of Phlorotannins from the Brown Alga, *Sargassum fusiforme* (Harvey) Setchell. *Marine Drugs*, 15: 1-15 <https://doi.org/10.3390/md15020049>.
- López Sánchez C. 2017. Macrofauna vágil asociada a *Sargassum* spp., su abundancia y diversidad de marzo-julio de 2007 en el área del Caribe colombiano. Tesis de licenciatura, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá.
- Lozano R. 2012. ¿Qué tan secundarios son los metabolitos secundarios? *Hidrobiológica*, 1: 45–57.
- Makkar H.P., G. Tran, V. Heuzé, S. Giger-Reverdin, M. Lessire, F. Lebas & P. Ankers. 2016. Seaweeds for livestock diets: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 212: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.018>
- Mansilla A. & K. Alveal. 2013. Capítulo 16: Generalidades sobre las Macroalgas, pp. 349-362. En: C. Werlinger (Ed.), *Biología Marina y Oceanografía: conceptos y procesos*, Trama Impresores S. A, Concepción.
- Martí R., M. Uriz & X. Turon. 2004. Seasonal and spatial variation of species toxicity in Mediterranean seaweed communities: correlation to biotic and abiotic factors. *Marine Ecology Progress Series*, 282: 73–85. <https://doi.org/10.3354/meps282073>
- Maschek J.A. & B.J. Baker. 2008. The chemistry of algal secondary metabolism, pp. 1–24. En: C.D. Amsler (Ed.). *Algal Chemical Ecology*. Springer, Germany.
- Máximo P., L. Ferreira, P. Branco, P. Lima & A. Lourenço. 2018. Secondary metabolites and biological activity of invasive macroalgae of Southern Europe. *Marine drugs*, 16: 1-28.
- Meretta P., C. Matula & G. Casas. 2012. Occurrence of the alien kelp *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyceae) in Mar del Plata, Argentina. *BioInvasions Records*, 1: 59–63.
- Milledge J., B. Smith, P. Dyer & P. Harvey. 2014. Macroalgae-derived biofuel: a review of methods of energy extraction from seaweed biomass. *Energies*, 7: 7194–7222.
- Milledge J. J., B.V. Nielsen & D. Bailey. 2016. High-value products from macroalgae: the potential uses of the invasive brown seaweed, *Sargassum muticum*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 15: 67–88.
- Morales M., P. Nunja, L. Burga, S. Justo, J. Ávila & A. Guerra. 2014. Actividad antimicrobiana del extracto acetona-agua de *Macrocystis pyrifera* (C. Agardh 1820) en bacterias de importancia clínica. *Revista de Ciencias*, 10: 109–118.
- Moreira L., R. Cabrera & A.M. Suárez. 2011. Evaluación de la biomasa de macroalgas marinas del género *Sargassum* C. Agardh (Phaeophyta, Fucales). *Revista de Investigaciones Marinas*, 27: 115–120.
- Murillo Álvarez J. I., M. Muñoz, A. Marín, B. Águas, M. Olgún, P. E. Pardo, E. S. Castro, M. A. Vergara, L. Gómez & A. Rodríguez Cuautle. 2012. Informe Técnico Parcial (enedic/2011) del Proyecto (SIP 20111014) Estudio del Potencial de Aplicación Biomédica y Ambiental de Algas del Género *Sargassum* y *Enteromorpha* Colectadas en el Golfo de California (Técnico Parcial). Disponible en http://www.sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20111014_10138.pdf [Consultado 10 noviembre 2018].

- Namvar F., R. Mohamad, J. Baharara, S. Zafar-Balanejad, F. Fargahi, H. S. Rahman. 2013. Antioxidant, antiproliferative, and antiangiogenesis effects of polyphenol-rich seaweed (*Sargassum muticum*). *BioMed Research International*, 2013: 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/604787>.
- Ortega Maldonado L. 2012. Producción de silimarina en cultivos celulares de Cardo mariano (*Silybum marianum*): efecto de distintos elicitores. Tesis de Maestría, Universidad de Salamanca, Salamanca.
- Patra J., A. Mahapatra, H. Thatoi, S. Das, R. Sahu & G. Swain. 2010. Antimicrobial activity of organic solvent extracts of three marine macroalgae from Chilika Lake, Orissa. India. *Malaysian Journal of Microbiology*, 5: 128–131.
- Paul V., I. Kuffner, L. Walters, R. Ritson-Williams, K. Beach & M. Becerro. 2011. Chemically mediated interactions between macroalgae *Dictyota* spp. and multiple life-history stages of the coral *Porites astreoides*. *Marine Ecology Progress Series*, 426: 161–170. <https://doi.org/10.3354/meps09032>.
- Pereira L. 2015. Seaweed flora of the European North Atlantic and Mediterranean, pp: 65-178. In: Kim S. (Ed.). *Handbook of Marine Biotechnology*. Springer. Heidelberg.
- Pereira R.C. & B.A. Da Gama. 2008. Macroalgal chemical defenses and their roles in structuring tropical marine communities, pp. 25–55. En: Amsler C. D. (Ed). *Algal Chemical Ecology*. Springer, Germany.
- Pramitha V.S. & N. Sree Kumari. 2016. Anti-inflammatory, anti-oxidant, phytochemical and gc-ms analysis of marine brown macroalga, *Sargassum wightii*. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical & Biological Sciences* 6: 7–15.
- Rico M., A.G. González, M. Santana-Casiano, M. González-Dávila, N. Pérez-Almeida & M.S. de Tangil. 2017. Production of Primary and Secondary Metabolites Using Algae, pp. 311–326. En: Nath Tripathi, B. & D. Kumar (Eds.), *Prospects and Challenges in Algal Biotechnology*. Springer. Singapore.
- Sahayaraj K. & S. Kalidas, S. 2011. Evaluation of nymphicidal and ovicidal effect of a seaweed, *Padina pavonica* (Linn.) (Phaeophyceae) on cotton pest, *Dysdercus cingulatus* (Fab.). *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 40: 125–129.
- Santhanam R., S. Ramesh & H.A.R. Suleria. 2018. *Biology and Ecology of Pharmaceutical Marine Plants*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 471 pp.
- Singh M., R. Kalaivani, S. Manikandan, N. Sangeetha & A. K. Kumaraguru. 2013. Facile green synthesis of variable metallic gold nanoparticle using *Padina gymnospora*, a brown marine macroalga. *Applied Nanoscience*, 3: 145–151. <https://doi.org/10.1007/s13204-012-0115-7>.
- Sotka E.E. & K. Whalen. 2008. Herbivore Offense in the Sea: The Detoxification and Transport of Secondary Metabolites, pp. 203–228. En: Amsler C.D. (Ed.), *Algal Chemistry*. Springer, Germany.
- Sudha, G. & A. Balasundaram. 2018. Analysis of bioactive compounds in *Padina pavonica* using HPLC, UV-VIS and FTIR techniques. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7: 3192–3195.
- Suutari, M., E. Leskinen, K. Fagerstedt, J. Kuparinen, P. Kuuppo & J. Blomster. 2015. Macroalgae in biofuel production. *Phycological research*, 63: 1–18.