

REVIEW / ARTÍCULO DE REVISIÓN

Utilización de macroalgas para la inducción de mecanismos defensivos ante agentes fitopatógenos causantes de enfermedades foliares en hortalizas

Use of macroalgae for the induction of defensive mechanisms against phytopathogens causing foliar diseases in vegetables

Pallo Edwin^{1,2*}, Leiva-Mora Michel³, Veloz Walter², Santana Rita²

DOI. 10.21931/RB/2023.08.03.43

¹ Universidad Nacional de Trujillo Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Peru.² Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ecuador.³ Laboratorio de Biotecnología, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.Corresponding author: el.pallo@uta.edu.ec

Resumen: La producción de hortalizas a nivel mundial ha crecido de forma sustancial, lo que ha ocasionado que la demanda de recursos utilizados para producir alimentos haya aumentado. Tal es el caso que en la actualidad la utilización de plaguicidas para la producción y manejo de los diferentes cultivos viene a ser indispensable, causando una serie de conflictos en la naturaleza, como son contaminación del suelo, agua, aire, convirtiéndolo en una problemática a ser atendida. Por tal razón, diferentes estudios han sido encaminados en la búsqueda de nuevas alternativas para el manejo de los cultivos, las cuales involucran la utilización de productos alternativos, uno de ellos, son los extractos de algas, estos extractos han demostrado contar con una amplia variedad de funciones que contribuyen significativamente a mejorar la productividad sin causar impactos negativos en el ambiente. Entre las bondades que presenta la utilización de extractos de macroalgas tenemos la actividad bioestimulante, mejoramiento del desarrollo de las plantas, incremento de la capacidad de retención de agua, activación de los sistemas de resistencia adquiridos, entre otros, permitiendo la obtención de alimentos saludables, con menor impacto al ambiente, mediante la utilización de un recurso marino renovable, que en la actualidad se encuentra disponible en el planeta, pasando a ser una importante alternativa productiva.

Palabras clave: Extractos de macroalgas, efectos, producción, patógenos, elicitores, sistemas de resistencia.

Abstract: The production of vegetables worldwide has grown substantially, which has caused the demand for resources used to produce food to increase. Such is the case that nowadays, the use of pesticides for the production and management of different crops has become indispensable, causing a series of conflicts in nature, such as contamination of soil, water and air, making it a problem to be addressed. For this reason, different studies have been directed in the search for new alternatives for crop management, which involve the use of alternative products, one of them is algae extracts; these extracts have shown to have a wide variety of functions that contribute significantly to improve productivity without causing negative impacts on the environment. Among the benefits of using macroalgae extracts are the biostimulant activity, improvement of plant development, increase of water retention capacity, and activation of acquired resistance systems, among others, allowing the production of healthy food with less impact on the environment through the use of a renewable marine resource, which is currently available on the planet, becoming an essential productive alternative.

Key words: Macroalgae extracts, effects, production, pathogens, elicitors, resistance systems.

Introducción

El fenómeno de migración de la población rural a las zonas urbanas es uno de los principales desafíos en la actualidad. Se espera que con el crecimiento poblacional se incremente la demanda de alimentos, generando que los sistemas agrícolas tiendan a incrementar sus niveles productivos con el fin de satisfacer la necesidad alimentaria de las grandes ciudades¹.

La producción de hortalizas a nivel mundial ha demostrado tener un importante incremento desde el 2000 al 2019, creciendo de un 11,1% a un 12,1 % del total de alimentos. Este aumento en la producción se debe principalmente a una combinación de factores (aumento del uso del riego, plaguicidas y fertilizantes en menor medida, una

mayor superficie cultivada, entre otros.); otro factor como el uso de cultivos de alto rendimiento juegan un papel importante en esta tendencia de crecimiento².

La producción de hortalizas en el mundo demanda recursos importantes (agua para riego, suelos fértiles, mano de obra, uso de productos químicos, semillas mejoradas, etc.), los cuales deben ser atendidos, uno de ellos es la dotación de plaguicidas que se han vuelto indispensables para el manejo de los diferentes cultivos.

Los insecticidas, herbicidas y fungicidas se aplican de manera generalizada en los sistemas de producción agrícola, para aumentar los rendimientos mediante el manejo de plagas, y enfermedades. Si bien son valiosos, estos

Citation: Edwin P, Leiva-Mora M, Veloz W, Santana R. Utilización de macroalgas para la inducción de mecanismos defensivos ante agentes fitopatógenos causantes de enfermedades foliares en hortalizas. *Revis Bionatura* 2023;8 (3) 43. <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2023.08.03.43>

Received: 20 June 2023 / **Accepted:** 25 August 2023 / **Published:** 15 September 2023

Publisher's Note: Bionatura stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



productos químicos también pueden tener efectos no deseados sobre la salud humana, la biodiversidad e incluso puede generar resistencia a los plaguicidas³.

Diferentes estudios han demostrado el daño en los ecosistemas debido al uso de plaguicidas. Según Hou *et al.*⁴ la piraclostrobina (PYRA) es un fungicida de estrobilurina muy popular debido a su control de amplio espectro de enfermedades fúngicas. Sin embargo, se ha determinado que PYRA tiene efectos negativos sobre las comunidades bacterianas (epifitas y endófitas) benéficas asociadas a las actividades de ciertas enzimas presentes en el suelo (des-hidrogenasa, catalasa, proteasa e invertasa), probadas en condiciones de laboratorio.

Estudios realizados por Ngameni *et al.*⁵ demostraron que la utilización de plaguicidas como imidacloprid, mancozeb, clorotalonil, cipermetrina, paraquat, lamba-cihalotrina) en cultivos cercanos a cuerpos de agua producen riegos agudos y crónicos para la sobrevivencia de peces y otras especies acuáticas. Frente a esta problemática las nuevas tendencias se orientan a generar alternativas agro-productivas que reemplacen los métodos tradicionales de manejo de plagas y enfermedades mediante la utilización de plaguicidas, dando como resultado un impacto menor en el medio ambiente.

La necesidad de contar con alternativas agro-productivas para el manejo integrado de cultivos contempla la utilización de diferentes estrategias, que incluyen el uso de aceites esenciales, extractos de plantas, químicos inorgánicos, bio-controladores, activadores de defensa, tratamientos de agua caliente, entre otros⁶.

Una alternativa reciente, es la utilización de extractos de macroalgas, que son compuestos ricos en macro y microelementos, vitaminas, proteínas, oligoelementos, aminoácidos esenciales los cuales son utilizados en agricultura como reguladores de crecimiento en las plantas⁷. Existen tres clases de macroalgas marinas las cuales son: verdes, pardas y rojas, que se han utilizado comercialmente para diversos fines, como bioestimulantes, antioxidantes, obtención de hidrogeles, incluidos en la agricultura.

Las algas marinas están disponibles en abundancia, aunque algunas de ellas son específicas de ciertas regiones⁸. Por ejemplo, en el caso del hemisferio sur, en el archipiélago Diego Ramírez al sur de Chile se registra las especies *Lessonia flavicans*, *Lessonia searlesiana* y *Macrocystis pyrifera*⁹. Para el caso de Ecuador los géneros más abundantes en el perfil costanero son: *Ceramium*, *Corrallina*, *Codium*, *Dyctyota*, *Ulva*¹⁰.

La utilización de extractos vegetales resulta ser una opción importante para reducir la afección que pueden causar determinados agentes fitopatógenos, en este sentido, se ha identificado que al utilizar extracto de *Lippia microphylla*, en concentraciones de 0,03 - 0,1 %, reducen el ataque de *Cladosporium sp.* en el cultivo de *Capsicum baccatum*¹¹. Del mismo modo, la aplicación de extractos de *Sargassum spp.* promueven la inducción de resistencia a *Fusarium oxysporum*, además de tener un efecto favorable sobre el crecimiento y desarrollo de la planta¹².

La necesidad urgente de alternativas ambientalmente amigables para el manejo de plagas y enfermedades son esenciales para la producción alimentaria y la agricultura sostenible¹³. En este contexto, el presente trabajo pretende recopilar investigaciones sobre la utilización de extractos de macroalgas marinas en las plantas de hortalizas, estudiando particularmente la inducción de resistencia y su actividad bioestimulante.

Potencial de algas marinas en el manejo de enfermedades en hortalizas

Las macroalgas son un grupo heterogéneo de organismos similares a plantas, las especies de coloración parda pertenecen al reino protista, mientras que las rojas y verdes son consideradas eucariotas. Están compuestas por microorganismos fotoautótrofos dominantes hasta plantas multicelulares, presentes en diversos hábitats acuáticos¹⁴. Las macroalgas marinas, principalmente las pardas han sido utilizadas durante mucho tiempo como fertilizantes del suelo, tienen varios efectos positivos sobre el crecimiento de las plantas¹⁵. La incorporación de algas al suelo incrementa el rendimiento de las cosechas y favorece la calidad de los frutos debido a que se administra a los cultivos no sólo todos los macro y micronutrientes que requiere la planta, sino también sustancias naturales como los polifenoles cuyos efectos son similares a los reguladores de crecimiento¹⁶.

Adicionalmente, numerosos estudios, *in vitro* y en planta, han demostrado la actividad inhibitoria de estos compuestos frente a fitopatógenos fúngicos. En general, un hongo puede verse afectado por compuestos como los polifenoles, que afectan directamente la pared o membrana celular¹⁷. Sin embargo, el modo de acción de los compuestos antifúngicos extraídos de las macroalgas aún es desconocido ya que depende del alga y su composición específica, así como del tipo de hongo al que se enfrenta.

El manejo de los principales agentes causantes de enfermedades en los cultivos hortícolas, por lo general tiene algún grado de complejidad, lo cual puede estar atribuido por la respuesta natural de cada fitopatógeno. Estudios realizados por Nofal *et al.*¹⁸ revelaron que mediante la utilización de extractos alcohólicos de *Sargassum muticum* es posible inhibir significativamente los daños causados por *Fusarium moniliforme*, *Pythium ultimum*, *Aspergillus flavus* y *Macrophomina phaseolina*. Esto se debió a la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides presentes en extracto de *S. muticum*, los cuales juegan un papel importante como antioxidantes y antimicrobianos que actúan dañando las estructuras celulares de los patógenos.

En la Figura 1 se muestra una red de co-ocurrencias basadas en la frecuencia con las que las palabras de los resúmenes y palabras clave aparecen juntas. Estas se calcularon considerando como palabras clave "seaweed extract"(extracto de algas), "plant diseases"(enfermedades de plantas), "biostimulant"(bioestimulantes), "vegetables"(hortalizas), dentro de la base de datos Scopus.

Es importantes considerar que el estudio se realizó entre los años 2019 al 2022, recopilando información sobre la temática antes mencionada. Se aprecia, la tendencia de las investigaciones sobre la utilización de extractos de algas en lechuga (*Lactuca sativa L.*) y tomate (*Solanum lycopersicum L.*), donde se muestra un efecto bioestimulante e inhibidor de patógenos causantes de enfermedades en las plantas.

Basados en las temáticas de las redes de co-ocurrencias se puede afirmar que aun existen pocas hortalizas estudiadas por lo que se recomienda ampliar esta área de conocimiento. Considerando el potencial que tiene las macroalgas para ser utilizadas en la agricultura, en la Tabla 1 se muestra algunos ejemplos de macroalgas y los efectos que produce en diferentes agentes patógenos.

Componentes constitutivos de las algas marinas

Las macroalgas poseen metabolitos secundarios con propiedades medicinales, antioxidantes, bioestimulantes, y

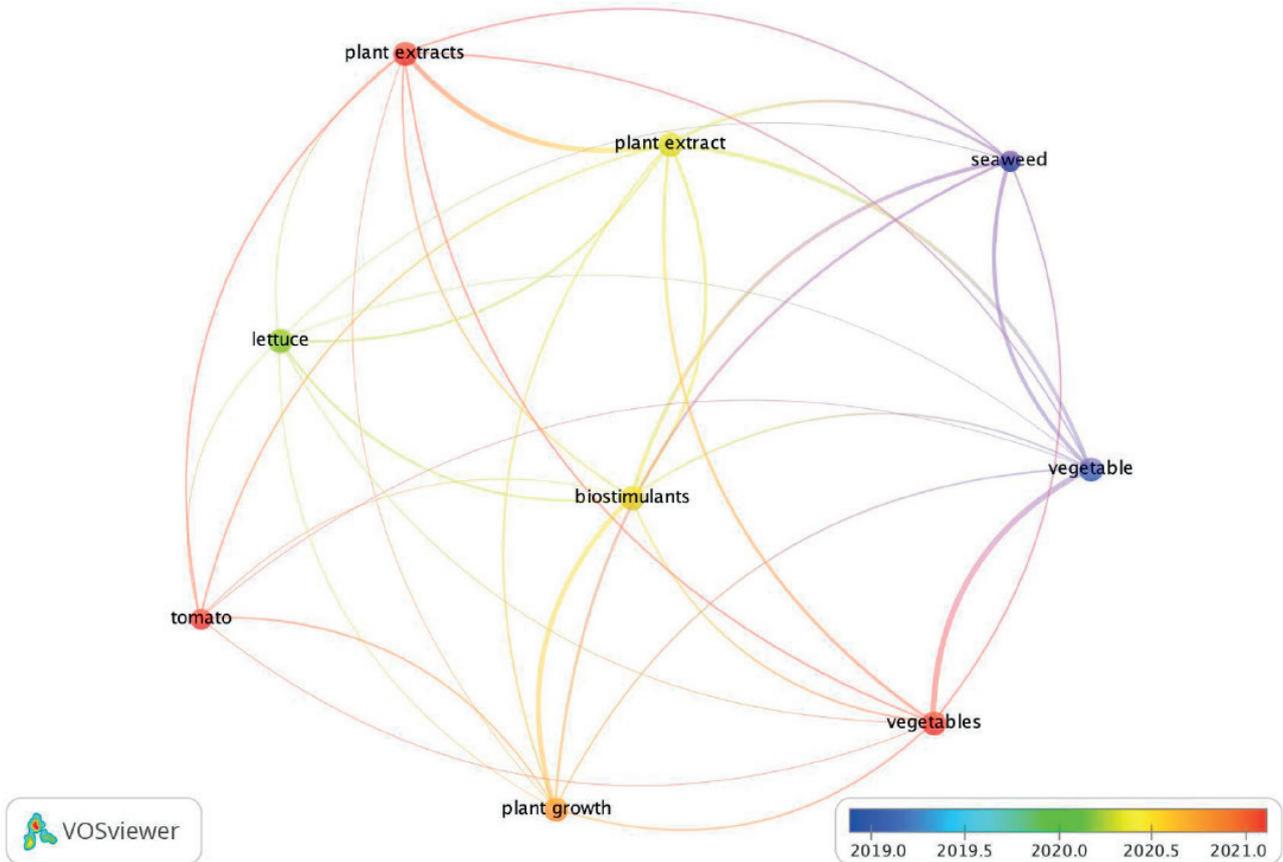


Figura 1. Redes de co-ocurrencias sobre el uso de extractos de algas en hortalizas.

otros. Estos pueden ser utilizados como biopesticidas, nutrientes, y potenciadores del crecimiento de las plantas¹⁴. La aplicación foliar es el método más popular para la aplicación de extractos, ya que las fitohormonas presentes en las algas se absorben mejor a través de las estomas de las hojas²⁷. Un ejemplo de extracto es el de *Ascophyllum nodosum* comercializado como (Stimplex®) contiene (proteínas/aminoácidos 3–6 %, lípidos 1 %, ácido algínico 12–18 %, fucosa 12–15 %, manitol 5–6 %, otros carbohidratos 10–20 %) mismos que al ser aplicados a las plantas han demostrado el potencial como bioestimulantes que poseen²⁸. La mayoría de los extractos disponibles comercialmente se preparan a partir de algas pardas como: *A. nodosum*, *Ecklonia máxima* o *Laminaria spp.* A diferencia de los fertilizantes químicos modernos, los extractos de macroalgas marinas son biodegradables, no tóxicos y provienen de un recurso renovable²⁹.

Los extractos usados para la producción de alimentos contienen un grupo importante de metabolitos que incluyen macro y microelementos, aminoácidos, aminopolisacáridos, proteínas, vitaminas, lípidos, oligo y polisacáridos, betainas, sustancias húmicas, hormonas, lípidos, compuestos fenólicos, y péptidos³⁰.

De la misma forma los extractos de algas marinas contienen muchos compuestos minerales y bioactivos, que incluyen polisacáridos complejos y ficocoloides, alginato y carragenina, que han demostrado mejorar la tolerancia a la salinidad en las plantas. Por ejemplo, el extracto de algas de *Padina gymnospora* promueve la absorción de nutrientes y el crecimiento en las plantas³¹. De igual manera la aplicación de extractos de *Cystoseira myrica*, incrementa la resistencia de las plantas frente a *F. oxysporum* en el cultivo de tomate³².

Una de las características que distingue a las algas marinas de otras especies es su gran contenido de polisacáridos sulfatados (SPs). El análisis químico y estructural de los polisacáridos presentes en la pared celular del alga *Codium sp.* ha demostrado la presencia de tres tipos diferentes de SPs, los galactanos sulfatados, los arabinos sulfatados y los mananos sulfatados, así como glicoproteínas ricas en hidroxiprolina (HRGP) que actúan como antioxidantes³³. De la misma forma se ha encontrado en *Laminaria japonica* (CPs) compuestos tales como ácido glucurónico, fucosa, ésteres sulfatados, que cumplen como antioxidantes sobre los radicales superóxidos e hidroxilo³⁴.

Los compuestos heteropolisacáridos sulfatados denominados ulvanos los cuales se encuentran presentes en las paredes celulares de las algas principalmente en el género *Ulva*, ejerce el mejoramiento de la resistencia de la planta de trigo al ataque de oídio causada por *Blumeria graminis f. sp. tritici*³⁵.

Las macroalgas contienen alta concentración de proteínas, fibra dietética, minerales y vitaminas. Las proteínas presentes en las algas son abundantes en glicina, arginina, alanina y ácido glutámico que son aminoácidos fundamentales en niveles equiparables a los requerimientos de lisina y cistina².

Se sabe que en los macrominerales prevalecen el sodio, calcio, potasio, cloro, azufre y fósforo. En cuanto a los micro minerales, se encuentra el yodo, hierro, zinc, cobre, selenio, molibdeno, flúor, manganeso, boro, níquel y cobalto. Por otro lado, el contenido de lípidos en algas es menor, representando aproximadamente de 1 a 5%. Además, las algas contienen una mayor cantidad de ácidos grasos esenciales en comparación con las plantas terrestres³⁶.

Por otro lado, las algas sintetizan ácidos grasos poli-

Alga	Patógeno	Acción	Cultivo en campo / cultivo <i>in vitro</i>	Referencia
<i>Sargassum fusiforme</i>	<i>Phytophthora infestans</i>	Muerte células hipersensibles del patógeno e incremento del O ₂ en la mitocondria	<i>Solanum lycopersicum</i>	19
	<i>Oidium</i> spp.			
	<i>Botrytis cinerea</i>			
<i>Acanthophora spicifera</i>	<i>Alternaria solani</i>	Incremento de genes implicados en la biosíntesis de auxina, giberelina y citoquinina	<i>Solanum lycopersicum</i>	20
<i>Sargassum vulgare</i>	<i>Xanthomonas campestris</i>		<i>Capsicum annuum</i>	
<i>Sargassum muticum</i>	<i>Fusarium moniliforme</i>	Desintegración del citoplasma del patógeno y generación de grandes cuerpos lipídicos en las vacuolas del patógeno	<i>In vitro</i>	18
	<i>Pythium ultimum</i>			
	<i>Aspergillus flavus</i>			
	<i>Macrophomina phaseolina</i>			
	<i>Colletotrichum lagenarium</i>			
<i>Ascophyllum nodosum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	Reducción progresiva de esporulación en el patógeno	<i>In vitro</i>	21
<i>Ulva lactuca</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i>	Reducción del crecimiento de hifas en el patógeno	<i>Solanum lycopersicum</i>	22
<i>Sargassum dentifolium</i>				
<i>Gracilaria compressa</i>				
<i>Anabaena minutissima</i>	<i>Podosphaera xanthii</i>	Activación de la expresión de genes dentro de la vía del ácido jasmónico y del ácido salicílico	<i>Cucumis sativus</i>	23
<i>Jania adhaerens</i>				
<i>Fucus vesiculosus</i>	<i>Fusarium culmorum</i> y <i>Fusarium oxysporum</i>	inhibir el crecimiento de macro conidios en el patógeno	<i>In vitro</i>	24
<i>Cystoseira myriophylloides</i>	<i>Verticillium dahliae</i>	Activación del mecanismo de resistencia inducida por el patógeno	<i>Solanum lycopersicum</i>	25
<i>Laminaria digitata</i>	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>			
<i>Fucus spiralis</i>				
<i>Chlorella minutissima</i>	<i>Aspergillus niger</i>	inhibición contra el crecimiento micelial del patógeno	<i>In vitro</i>	26
<i>Chlorella protothecoides</i>				

Tabla 1. Principales especies de macroalgas y sus efectos contra patógenos en las hortalizas.

insaturados de cadena extensa, en los cuales destaca el ácido eicosapentaenoico (EPA) y docosahexaenoico (DHA) que pertenecen al núcleo familiar de ácidos grasos. Además de sus elementos nutritivos, las algas tienen, compuestos bioactivos de alta capacidad antioxidante, como carotenoides y polifenoles³⁶.

La existencia de diferentes compuestos en las algas, tales como: fitohormonas y reguladores de crecimiento (citoquininas, auxinas, giberelinas, betaínas, ácido abscísico y brasinoesteroides), diferentes polisacáridos matriciales y de reserva (alginatos, carragenatos, agar, ulvanos, mucopolisacáridos y sus oligosacáridos, fucoidano, laminarano, almidón y fluroideo), oligosacáridos, biotoxinas y compuestos antioxidantes (polifenoles, bromofenoles, flavonoides, polímeros de fluoroglucinol, ésteres gálicos, cumarinas, flavononas, fluorotaninos, protoantocianidinas oligoméricas, diterpenos y monoterpenos polihalogenados, cetonas halogenadas y compuestos isoprenoides), entre otros convierte a las algas en un potencial producto para ser utilizado en la

producción de hortalizas por los diferentes beneficios que estos pueden brindar³⁷.

La estructura compleja de la pared celular de las algas marinas no es fácilmente accesible para los microorganismos. El aislamiento y la caracterización de cepas bacterianas específicas que colonizan las algas proporcionan oportunidad para descubrir nuevos recursos biológicos para la descomposición de las macroalgas e identificar nuevas enzimas que contribuyan a la capacidad de degradación³⁸. Por tal razón en la Tabla 2 se muestran diferentes compuestos activos presentes en los extractos de las macroalgas que han sido mayormente estudiados.

Efectos elicitors de algas marinas

Hay una amplia gama de agentes con efectos defensivos a patógenos en las plantas. Estos agentes reciben el nombre de elicitors. Un elicitor es un compuesto o molécula que induce la acumulación de sustancias que protegen a la planta de agentes patógenos, como por ejemplo una

Compuesto activo	Algas	Contenido	Efecto	Referencia
Alginato	<i>Ascophyllum</i> spp.	41-52%	Mejorar la tolerancia a la salinidad	31
	<i>Macrocystis</i> spp.	42-45%		39
	<i>Sargassum</i> spp.	-		
	<i>Laminaria japonica</i>	50%		
	<i>Padina</i> sp.	28,4%		
Betaínas	<i>Ascophyllum nodosum</i>	n/d	Alivian el estrés osmótico causado por salinidad y sequía, incrementa en contenido de clorofila	40
	<i>Laminaria japonica</i>	n/d		41
Manitol	<i>Ascophyllum nodosum</i>	2 – 7,5 %	Adaptación a estrés, efecto bioestimulantes del crecimiento, activación de mecanismos de defensa	42
	<i>Saccarina latissima</i>	<15 %		43
	<i>Alaria esculenta</i>	<15 %		44
Polifenoles totales (mgGAE/g PS)	<i>Posidonia oceánica</i>	29 – 40	Antioxidante y reforzador de la pared celular, evitando el ataque de patógenos	42
	<i>Ascophyllum nodosum</i>	15-115		45
Ulvano	<i>Posidonia oceánica</i>	Xilosa 0,5 – 1,7%	Estabilizador y promotor de crecimiento de las plantas	42
	<i>Ascophyllum nodosum</i> <i>Ulva lactuca</i>	4-15%		46
Laminaranos	<i>Ascophyllum nodosum</i>	4%	Efecto elicitor que estimula la síntesis de fitoalexinas y sustancias con efecto antifúngico	42
				47
Fucanos	<i>Saccharina latissima</i> <i>Alaria esculenta</i>	3,9 %	Efecto elicitor en el metabolismo vegetal y la inducción que promueven la síntesis de sustancias de respuesta	47
		7,2 %		48

Tabla 2. Ejemplos de compuestos activos presentes en diferentes extractos de algas y su acción en los vegetales.

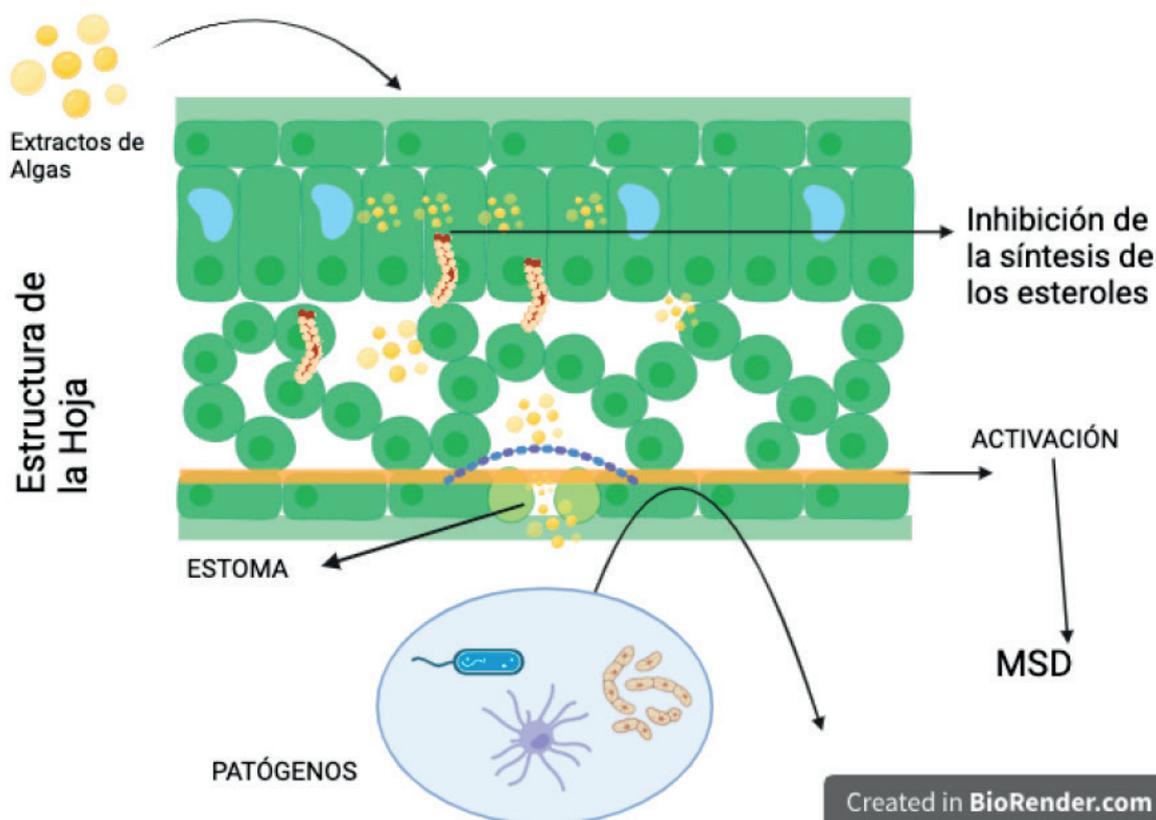


Figura 1. Ilustración esquemática sobre la acción de los extractos de algas en las plantas y la inhibición de síntesis de los esteroides, dando como respuesta la activación de los mecanismos de defensas frente a la infección (MSD), adaptado de (17, 50).

respuesta de la planta es la capacidad de producir fitoalexinas que son metabolitos secundarios que han sido sintetizadas en los vegetales después de una infección microbiana. La resistencia de las plantas contra los patógenos es el resultado de la aplicación de diferentes compuestos activos¹⁹. Los elicitores pueden tener origen biótico o abiótico, ya que se pueden obtener o aislar de bacterias, hongos, algas, plantas o pueden sintetizarse químicamente. Diversos tipos de moléculas pueden actuar como elicitores: proteínas, ácidos grasos, lípidos, oligosacáridos, polisacáridos y péptidos⁴⁹.

Dado la existencia de diversas especies de macroalgas con efectos elicitores y cualidades específicas, la información sobre los mecanismos de acción de los extractos de algas en las plantas es limitada. Sin embargo, diferentes estudios, citan ciertas actividades metabólicas como: compuestos que se dirigen directamente a la pared o membrana celular del hongo u otros componentes celulares, tales como los ácidos nucleicos o las mitocondrias, los cuales pueden interrumpir la síntesis de proteínas por su interacción con los ácidos nucleicos, alterar la homeostasis y la estabilidad de la célula al interferir con la cadena respiratoria mitocondrial⁵⁰.

Otro mecanismo antifúngico propuesto, está relacionado con la capacidad de interactuar/inhibir la síntesis de esteroides Figura 2, como lo demuestra *Candida spp.* contra hongos fitopatógenos filamentosos los cuales interactúan con la caracterización química de los ácidos grasos insaturados (definidos por uno o más enlace/s C=C), que pueden mejorar la acción antifúngica de estos compuestos. Esta propiedad está asociada con la fácil incorporación de lípidos poliinsaturados a la membrana fúngica, lo que también

contribuye a la desestabilización de la estructura celular¹⁷.

Resistencia Sistémica Adquirida SAR

Las plantas hospedadoras eventualmente pueden protegerse contra el ataque de patógenos, si con anterioridad han sobrevivido a una infección por virus, bacterias u hongos patógenos. Se considera que una primera infección, o daño, "inmuniza" al vegetal contra infecciones posteriores por patógenos homólogos. La primera expresión de resistencia "adquirida" por las plantas es la reacción contra las infecciones de patógenos, independientemente si son virus, bacterias u hongos. Esta respuesta es llamada resistencia sistémica adquirida (SAR). La SAR se refiere a distintas vías de transducción de señales que juegan un rol importante en la habilidad expresada por la planta para defenderse contra los patógenos⁵¹.

Las respuestas de defensa pueden ser cebadas. Este tipo de resistencia, a menudo, actúa de forma sistémica y es efectiva contra un amplio espectro de plagas. La utilización de extractos de macroalgas promueve actividades enzimáticas de defensa y niveles fenólicos altos de manera sostenible. La activación de las vías de defensa se confirma en la regulación positiva de las transcripciones de genes los cuales están implicados en las vías de señalización de defensa, de la misma forma plantas tratadas con extractos muestran un efecto regulador sobre los genes implicados en la biosíntesis de auxina (IAA), giberelina (Ga2Ox) y citoquinina (IPT)⁵².

Aminoácidos aportados por los extractos de macroalgas a la planta

Las algas marinas y sus derivados se han utilizado am-

pliamente como bioestimulantes en la producción de cultivos debido a la presencia de múltiples reguladores del crecimiento, como citoquininas, auxinas, giberelinas, betaínas, así como a la presencia de macronutrientes como Ca, K, P y micronutrientes como Fe, Cu, Zn, B, Mn, Co y Mo, que son necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Numerosos estudios han revelado una amplia gama de efectos beneficiosos del extracto de algas marinas en las plantas, como la germinación y el establecimiento temprano de semillas, un mejor desarrollo vegetativo y rendimiento de los cultivos, la inducción de resistencia al estrés biótico y abiótico y muchos otros beneficios⁵³.

Según Palasi J.⁵⁴ las algas contienen 15 aminoácidos los cuales son: ácido aspártico, ácido glutámico, asparagina, serina, histidina, treonina, arginina, alanina, tirosina, glicina, valina, isoleucina, leucina, fenilalanina y lisina, los cuales actúan directamente en las plantas promoviendo un mejor desarrollo

Ciertos extractos han resultado tener efectos positivos en plantas que han sufrido algún grado de estrés salino como es el caso de *S. muticum* y *Jania rubens* L. Investigaciones realizadas sobre el tema han demostrado que la aplicación de mencionados extractos en plantas de garbanzos (*Cicer arietinum* L) mejora el crecimiento de las plantas debido a la acumulación de pigmentos fotosintéticos, aminoácidos como prolina, treonina o serina y potasio. Además, se incrementó la actividad del superóxido dismutasa y la peroxidasa, reduciendo las especies reactivas del oxígeno y permitiendo un continuo crecimiento de las plantas bajo estrés salino⁵⁵.

Otros trabajos han demostrado que mediante la utilización de extractos de *A. nodosum* en uva (*Vitis vinifera*), se incrementó su crecimiento, mejoraron las propiedades químicas y cromáticas de las uvas y por tanto de los vinos, haciéndolos más atractivos para el consumidor⁵⁶. Por otro lado, la utilización de extracto de *Macrocystis pyrifera* sobre pepinos (*Cucumis sativus*), permitió incrementar la concentración en vitamina C, y de antioxidantes. Esto ha permitido una disminución importante en la utilización de fertilizantes de origen sintéticos con efectos adversos en el medio ambiente y en nuestra salud⁵⁷.

Investigaciones realizadas mediante la aplicación de extractos de *Ecklonia maxima* (KELPAKÒ), en plantas de sauce han presentado un incremento importante en el crecimiento y desarrollo de la masa vegetal, así como del tamaño y la acumulación de foto asimilados, y principalmente el incremento en tiamina y nicotinamida, mejorando sustancialmente las características de las plantas estudiadas⁵⁸.

De la misma forma, la combinación del ácido 5-amino-levulínico más extractos de *A. nodosum* presenta efectos positivos para la producción agrícola en condiciones de estrés por salinidad. La aplicación de esta solución en plantas de *Asparagus aethiopicus* L. en condiciones de salinidad (2000 - 4000 ppm de NaCl), se evidencia un efecto sinérgico que incrementa la expresión de genes responsables del uso del agua, producción de metabolitos secundarios y acumulación de antioxidantes en plantas. De tal forma que, se observó una mejoría en la concentración de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos los cuales controlan la acumulación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS), además del contenido de clorofilas, prolina, azúcares, el intercambio de gases, así como la actividad fotosintética⁵⁹.

En concordancia con estos estudios, otras publicaciones referentes a extractos de algas procedentes de *A. nodosum* y *Kappaphycus alvarezii* D. han demostrado que

se mejora el contenido en osmoprotectores como: prolina, azúcares solubles, induciendo el aumento de la concentración de antioxidantes tales como catalasas o ascorbato peroxidasa. De hecho, se ha podido analizar que mediante la aplicación de extracto de *K. alvarezii* ha incrementado la expresión de genes antioxidantes en respuesta al estrés⁵³. Por otro lado, el uso de extractos de algas también puede contribuir a disminuir las deficiencias en Fe o K. Según varios estudios, la utilización de extractos de algas procedentes de *A. nodosum* y *Durvillea potatorum* mitiga la clorosis producida por deficiencias de hierro, aumenta la adquisición de potasio e incrementa la calidad en algunos productos vegetales como las lechugas (*Lactuca sativa* cv. Verde), que pueden ser conservadas durante más tiempo tras su cosecha gracias a su mayor contenido en K⁶⁰.

Los investigadores han dedicado numerosos esfuerzos para explorar el potencial de los extractos de algas en los cultivos. Estos extractos desempeñan diversas funciones, como mejorar las actividades metabólicas de las plantas, actuar como bioestimulantes y generar resistencia al ataque de agentes patógenos. Esto los convierte en un producto altamente prometedor para su uso en la agricultura, ya que ayudan a mitigar los inconvenientes asociados con la agricultura convencional, como el uso de plaguicidas y fertilizantes sintéticos. En consecuencia, la utilización de extractos se presenta como una alternativa sostenible y respetuosa con el ambiente.

Conclusiones

Analizando los diferentes trabajos realizados con la utilización de extractos de macroalgas marinas en la producción agrícola, se puede presumir que estos productos tienden a ser una respuesta importante ante el incremento en el consumo de hortalizas a nivel mundial generado por la expansión de superficies cultivadas, incrementando la incidencia de plagas y enfermedades elevando los costos de producción y una reducción en el rendimiento. A través de la utilización de extractos de macroalgas se logra contribuir con múltiples efectos positivos, tanto para los cultivos como para sus consumidores, reduciendo el impacto que la agricultura convencional ocasiona al ambiente, brindando nuevas oportunidades para la generación de alternativas tecnológicas para la constante lucha contra factores bióticos y abióticos que inciden en la agricultura.

Recomendaciones

Asimismo, se ha evidenciado que los extractos derivados de macroalgas no generan efectos negativos en los vegetales en ninguna etapa de su desarrollo, sino todo lo contrario: contribuyen a mejorar su crecimiento y desarrollo. Los extractos de algas marinas tienen la capacidad de inducir diversas vías bioquímicas en las plantas, lo que resulta en un aumento en la producción de flavonoides secretados por las raíces y favorece la colonización de microorganismos beneficiosos en la planta. Además, se ha observado que estos extractos facilitan la absorción de nutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), azufre (S), magnesio (Mg), zinc (Zn), manganeso (Mn) y hierro (Fe)⁶¹.

Los extractos de macroalgas marinas pueden emplearse tanto en forma sólida como líquida como tratamiento para las semillas, aplicándose mediante pulverización foliar o directamente al suelo, con el propósito de nutrir las

plantas y aumentar los niveles de fertilidad. Estos extractos también pueden combinarse con fertilizantes alternativos, lo cual reduce la necesidad de utilizar productos químicos en el suelo, lo que resulta especialmente relevante en la agricultura ecológica.

La situación actual a nivel mundial y el interés de los países por reducir el uso de productos sintéticos, como fertilizantes y plaguicidas, en la producción agrícola ha generado una demanda creciente de agentes ecológicos no químicos. Estos agentes se han vuelto cada vez más importantes para asegurar una producción de alimentos libre de sustancias contaminantes.

Agradecimiento

Los autores agradecen por el apoyo a los Docentes del programa de Doctorado en ciencias agropecuarias de la Universidad Nacional de Trujillo, a los docentes de la Facultad de Ciencias agropecuarias de la Universidad Técnica de Ambato, por todo el apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Referencias bibliográficas

- Nath P, Iyer CPA, Dutta OP, Swamy KRM, Prabhakar BS, Gaddagimath P B, The basics of human civilization: Food, agriculture and humanity: New Deli. 2021; 1-676.
- World Food and Agriculture – Statistical Yearbook World Food and Agriculture Statistical Yearbook. Available FAO [internet] 2021. Disponible en: HIPERVÍNCULO: www.fao.org/3/cb4477en/cb4477en.pdf
- Maino JL, Thia J, Hoffmann AA, Umina PA. Estimating rates of pesticide usage from trends in herbicide, insecticide, and fungicide product registrations. *Crop Protection*, 2023; p. 163
- Hou K, Lu C, Shi B, Xiao Z, Wang X, Zhang J, Cheng C, Ma J, Du Z, Li B, Zhu L. Evaluation of agricultural soil health after applying pyraclostrobin in wheat/maize rotation field based on the response of soil microbes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022; p. 340
- Ngameni NT, Njikam NA, Kenko DBN, Fodouop EJT, Douatsop VCT. Ecological risk assessment of pesticides in the Ngouoh Ngouoh watershed of the Foubot Municipality in the west region of Cameroon using the PRIMET model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022; 195(1), 215.
- Krasnow C, Ziv C, Non-Chemical Approaches to Control Post-harvest Gray Mold Disease in Bell Peppers. *MDPI. In Agronomy Vol. 12- 216 Issue 1. 2022 p. 13*
- Medjdoub R. LA ALGAS MARINAS Y LA AGRICULTURA-I Zaragoza 2020 Disponible en: HIPERVÍNCULO: www.adiego.com-www.catsaigner.com
- Ali O, Ramsuhag A, Jayaraman J. Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *MPDI, Plants Vol. 10, Plants*. 2021; p. 1–27.
- Marambio J, Rosenfeld S, Rodríguez JP, Méndez F, Contador T, Mackenzie R. Siete nuevos registros de macroalgas para el archipiélago Diego Ramírez: el valor del nuevo parque marino como sumidero de carbono y conservación de la biodiversidad subantártica. *Anales Instituto Patagonia*. 48(3). 2020; p. 99–111.
- Cuvi Fajardo N, Cornejo X. Una revisión actualizada de las macroalgas marinas del Ecuador continental. *Ciencia Natural y Ambiente*. 14(2). 2020: p 201 – 209.
- Pinto K, Barbosa L, Ferreira D, do Nascimento L. HEALTH AND PHYSIOLOGY OF SEED PEPPERS CAMBUCI *Capsicum baccatum* L. var. pendulum TREATED WITH EXTRACT Lippia microphylla- *Biociencia* 30 (3), 2014; p. 743 – 749.
- Rivera Solís LL, Rodríguez Jasso RM, Flores López ML, Robledo Olivo A, Sandoval Rangel A, Sariñana Aldaco O. EXTRACTOS DE *Sargassum* spp. COMO INDUCTORES DE TOLERANCIA A *Fusarium oxysporum* EN PLÁNTULAS DE TOMATE. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8(1). 2021; p 7.
- Belmain SR, Tembo Y, Mkindi AG, Arnold S, Stevenson P. Elements of agroecological pest and disease management. *Elementa* 12;10(1). 2022; p. 14.
- Shah Z, Badshah SL, Iqbal A, Shah Z, Emwas AH, Jaremko M. Investigation of important biochemical compounds from selected freshwater macroalgae and their role in agriculture. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 9(1). 2022; p. 1–11.
- Fatimah S, Alimon H, Daud N. The effect of seaweed extract (*Sargassum* sp) used as fertilizer on plant growth of capsicum annum (chilli) and lycopersicon esculentum (tomato). *Indonesian Journal of Science and Technology*. 3(2). 2018; p. 15–23.
- Martínez Ruiz M, Molina Vázquez A, Santiesteban Romero B, Reyes Pardo H, Villaseñor Zepeda K, Meléndez Sánchez E. Micro-algae assisted green bioremediation of water pollutants rich leachate and source products recovery. *Environmental Pollution*. 1; 306. 2022; p. 16.
- Vicente L, Lemos M, Félix R, Valentão P, Félix C. Marine macroalgae, a source of natural inhibitors of fungal phytopathogens. *Journal of Fungi* 12 ;7. 2021; p. 1006.
- Nofal A, Azzazy M, Ayyad S, Abdelsalm E, Abousekken M, Tammam O. Evaluation of the brown alga, *Sargassum muticum* extract as an antimicrobial and feeding additives. *Brazilian Journal of Biology*. 84. 2024; p. 9.
- Sbaihah L, Takeyama K, Koga T, Takemoto D, Kawakita K. Induced resistance in *Solanum lycopersicum* by algal elicitor extracted from *Sargassum fusiforme*. *Scientific World Journal*. 1. 2015; p. 9.
- Ali O, Ramsuhag A, Jayaraman J. Application of extracts from Caribbean seaweeds improves plant growth and yields and increases disease resistance in tomato and sweet pepper plants. *Springer Phytoparasitica*. 2022; p. 19.
- Melo T, Serra I, do Nascimento J. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract effect on morphology and cellulolytic ability of the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*. *Research, Society and Development*. 9(11); e4079119913. 2020; p. 6.
- Mostafa YS, Alamri SA, Alrumman S, Hashem M, Taher M, Baka Z. In Vitro and In Vivo Biocontrol of Tomato *Fusarium Wilt* by Extracts from Brown, Red, and Green Macroalgae. *MPDI. Agriculture (Switzerland)*. 1;12(3). 2022; p. 345 – 363.
- Righini H, Somma A, Cetrullo S, D'adamo S, Flamigni F, Martel Quintana A. Inhibitory activity of aqueous extracts from *Anabaena minutissima*, *Ecklonia maxima* and *Jania adhaerens* on the cucumber powdery mildew pathogen in vitro and in vivo. *Journal Appl Phycology* 32. 2020; p. 3363 – 3375.
- Tyskiewicz K, Tyskiewicz R, Konkol M, Rój E, Jaroszk Scisiel J, Skalicka Wozniak K. Antifungal Properties of *Fucus vesiculosus* L. Supercritical Fluid Extract against *Fusarium culmorum* and *Fusarium oxysporum*. *MPDI Molecules*. 24(19). 2019; p. 3518.
- Esserti S, Smaili A, Rifai L, Koussa T, Makroum K, Belfaiza M. Protective effect of three brown seaweed extracts against fungal and bacterial diseases of tomato. *J Appl Phycology*. 29(2). 2017; p. 1081–93.
- Vehapi M, Koçer A, Yılmaz A, Özçimen D. Investigation of the antifungal effects of algal extracts on apple-infecting fungi. *Arch Microbiol*. 202(3). 2020; p. 455–71.
- Gitau M, Farkas A, Ördög V, Maróti G. Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (*Solanum lycopersicum*). *J Clean Prod*. 364:132689. 2022; p. 12.
- Ali O, Ramsuhag A, Jayaraman J. Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment. *PLOS One*. 1;14(5). 2019; p. 11.

29. Renaut S, Masse J, Norrie J, Blal B, Hijri M. A commercial seaweed extract structured microbial communities associated with tomato and pepper roots and significantly increased crop yield. *Microb Biotechnol.* 12(6). 2019; p. 1346–58.
30. Garcés Fiallos FR, de Quadros FM, de Freitas MB. Marine Resources with Potential in Controlling Plant Diseases. In: Cap 24. 2021 p. 703–19.
31. Hernández R, Sánchez C, Palmeros P, Ocampo H, Santacruz F, Meza I.D. Seaweed Extract Improves Growth and Productivity of Tomato Plants under Salinity Stress. *Agronomy.* 12(10): 2022; p.1–23.
32. Mostafa M, Mousa Sh, Abla AM, Biological Control of Fusarium Wilt Disease of Tomato Plants Using Seaweed Extracts. *Arabian Journal for Science and Engineering* 45(6): 2020; p. 4557–4570.
33. Aitouguinane M, Alaoui Talibi Z, Rchid H, Fendri I, Abdelkafi S, El-Hadj M. Polysaccharides from Moroccan Green and Brown Seaweed and Their Derivatives Stimulate Natural Defenses in Olive Tree Leaves. *Applied Sciences (Switzerland).* 1;12(17). 2022; p. 8842.
34. Zhao X, Xue CH, Li BF. Study of antioxidant activities of sulfated polysaccharides from *Laminaria japonica*. *J Appl Phycology.* 20(4): 2008; p.431–436.
35. Velho AC, Dall Asta P, de Borba MC, Magnin Robert M, Reignault P, Siah A. Defense responses induced by ulvan in wheat against powdery mildew caused by *Blumeria graminis* f. sp. *tritici*. *Plant Physiology and Biochemistry.* 184. 2022; p. 14–25.
36. Quitral VR, Morales CG, Sepúlveda ML, Schwartz M. Nutritional and health properties of seaweeds and its potential as a functional ingredient. *Revista Chilena de Nutrición* 39(4): 2022; p. 196–202
37. López-Padrón I, Martínez-González L, Pérez-Domínguez G, Reyes-Guerrero Y, Núñez-Vázquez M, Cabrera-Rodríguez J. (2022). Algae and their uses in agriculture. An update *Cultivos Tropicales.* 2022 41 (. 2) e10. p. 18.
38. Li Z, Du Z, Li H, Chen Y, Zheng M, Jiang Z. Characterisation of marine bacterium *Microbulbifer* sp. ALW1 with *Laminaria japonica* degradation capability. *AMB Express* 12(1). 2022. p. 13.
39. Gómez Matos M, Martínez Balmori D, Coll García Y. (2023). Alginate and their oligosaccharides from drifting brown algae: preparation and agricultural bioactivity. A review. *Rev Cubana Quím* 35(1). 2023 p. 46- 67
40. Chaman Medina M, Veneros R, Araujo E, Ramírez A, Hidalgo A, Bernabé S. Proline content in *Solanum lycopersicum* pretreated with glycine betaine under salt stress. *Rebiol* 34(1): 2014; p. 19–25
41. Pérez-Madruga Y, López-Padrón I, Reyes-Guerrero Y. Las algas como alternativa natural para la producción de diferentes cultivos. *Cultivos Tropicales* 41(2):9. 2020; p. 21.
42. Bruno A, Velders AH, Biasone A, Li Vigni M, Mondelli D, Miano T. Chemical Composition, Biomolecular Analysis, and Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopic Fingerprinting of *Posidonia oceanica* and *Ascophyllum nodosum* Extracts. *Metabolites.* 13(2): 2023; p. 170.
43. Cabrera AR, Torres JL, Medero Vega VR, Basail Pérez M, Santos Pino A, Gutiérrez Sánchez Y. In vitro conservation of *Ipomoea batatas* (L.) Lam cultivars by minimum growth with the use of mannitol. *Biotechnología Vegetal.* 19. 2019; p. 43 – 51.
44. Birgersson PS, Oftebro M, Strand WI, Aarstad OA, Sætrum GI, Sletta H, Sequential extraction and fractionation of four polysaccharides from cultivated brown algae *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *Algal Res.* 1;6. 2023; 102928 p. 14.
45. Bellucci E, Bis-Souza C, Domínguez R, Bermúdez R, Barreto A. Addition of Natural Extracts with Antioxidant Function to Preserve the Quality of Meat Products. *MDPI Biomolecules.* 12. 2022; p. 1506.
46. Peso-Echarri P, Frontela-Saseta C, González-Bermúdez CA, Ros-Berruezo GF, Martínez-Graciá C. Polisacáridos de algas como ingredientes funcionales en acuicultura marina: Alginato, carragenato y ulvano. *Revista de Biología Marina y Oceanografía.* Universidad de Valparaíso. 47. 2012; p. 373–81.
47. Espinosa A., Hernández A.M., Herrera R., (2020). Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas. *Biotechnología Vegetal.* 20.
48. Rhein-Knudsen N, Reyes-Weiss D, Horn SJ. Extraction of high purity fucoidans from brown seaweeds using cellulases and alginate lyases. *Int J Biol Macromol.* 2023; p. 199–209.
49. González I. Study for the application of seaweed extracts (*Sargassum muticum*) and other agents to induce resistance against pathogenic fungi of pepper. Universidad la Coruña. 2019. Disponible en: HIPERVÍNCULO: <http://hdl.handle.net/2183/24488>
50. Vicente TF, Lemos M, Félix R. Valentão P, Félix C. (2021). Marine macroalgae, a source of natural inhibitors of fungal phytopathogens. *MDPI Journal of Fungi* 7. 2021; p. 1006 - 25
51. Camarena G, de La Torre R. RESISTENCIA SISTÉMICA ADQUIRIDA EN PLANTAS: ESTADO ACTUAL. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* Chapingo, 13. 2007; p. 156 - 162
52. Ali O, Ramsuhag A, Jayaraman J. Phytoelicitor activity of *Sargassum vulgare* and *Acanthophora spicifera* extracts and their prospects for use in vegetable crops for sustainable crop production. *Revista de Ficología Aplicada* 33(1). 2021; p. 639–51.
53. Begum M, Bordoloi BC, Singha DD, Ojha NJ. Role of seaweed extract on growth, yield and quality of some agricultural crops: A review. *Agricultural Reviews.* 39(4). 2018; p. 321-326
54. Palasi J. Caracterización físico-química y nutricional de algas en polvo empleadas como ingrediente alimentario. Universidad Politécnica de Valencia 2015; p. 48.
55. Abdel Latef A, Srivastava A, Saber H, Alwaleed E, Tran LSP. *Sargassum muticum* and *Jania rubens* regulate amino acid metabolism to improve growth and alleviate salinity in chickpea. *Scientific reports.* 1;7(1). 2017; p. 10537 – 12.
56. Frioni T, Sabbatini P, Tombesi S, Norrie J, Poni S, Gatti M, Effects of a biostimulant derived from the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* on ripening dynamics and fruit quality of grapevines. *Sci Hortic.* 232. 2018; p. 97–106.
57. Valencia RT, Acosta LS, Hernández MF, Rangel PP, Robles M, Cruz R. Effect of seaweed aqueous extracts and compost on vegetative growth, yield, and nutraceutical quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruit. *Agronomy.* 2018; 15;8(11).
58. Digruber T, Sass L, Cseri A, Paul K, Nagy A, Remenyik J. Stimulation of energy willow biomass with triacontanol and seaweed extract. *Ind Crops Prod.* 120. 2018; p. 104–12.
59. Al-Ghamdi AA, Elansary HO. Synergetic effects of 5-amino-levulinic acid and *Ascophyllum nodosum* seaweed extracts on *Asparagus phenolics* and stress related genes under saline irrigation. *Plant Physiology and Biochemistry.* 129. 2018; p. 273–84.
60. Nanda S, Kumar G, Hussain S. (2022) Utilization of seaweed-based biostimulants in improving plant and soil health: current updates and future prospective. *International Journal of Environmental Science and Technology.* Institute for Ionics. 19, 2022; p. 12839–52.
61. Hamed SM, Abd El-Rhman AA, Abdel-Raouf N, Ibraheem I. (2018). Role of marine macroalgae in plant protection & improvement for sustainable agriculture technology. *Beni Suef Univ J Basic Appl Sci* 7(1): 2018; p. 104–10.