



Revisar artículo

Aplicación foliar húmica como tecnología sostenible para mejorar el crecimiento, el rendimiento y la protección frente al estrés abiótico de los cultivos agrícolas. Una revisión



Octávio Vioratti Telles de Moura, Ricardo Luiz Louro Berbara, Danielle França de Oliveira Torchia, Hellen Fernanda Oliveira Da Silva, Tadeu Augusto van Tol de Castro, Orlando Carlos Huertas Tavares, Natália Fernandes Rodrigues, Everaldo Zonta, Leandro Azevedo Santos, Andrés Calderín García [†]

Laboratorio de Química Biológica de Suelos, Departamento de Suelos, Universidad Federal Rural de Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ, Brasil.

ARTÍCULO EN F O R M A

Historia del artículo:

Recibido el 31 de diciembre de 2022

Revisado el 13 de marzo de 2023

Aceptado el 2 de mayo de 2023

Disponibile en línea el 10 de mayo de 2023

Palabras clave:

Sustancias húmicas
Bioestimulantes
Biofertilizantes
Fitotecnia Ácidos húmicos

A B S T R A C T O

La aplicación de sustancias húmicas (HSs) promueve efectos bioactivos en las plantas, estimulando el crecimiento y el desarrollo, promoviendo contra estreses bióticos y abióticos y aumentando la productividad agrícola. Existen innumerables ejemplos de fertilizantes y bioestimulantes elaborados a partir de HSs que son capaces de ser utilizados para formar tecnologías agrícolas inteligentes de última generación con mayor eficiencia debido a su versatilidad y riqueza estructural. En los últimos años, la fitotecnia asociada a la aplicación de SA al follaje ha mejorado, y las aplicaciones se han extendido a todos los grupos de plantas; sin embargo, los estudios son desagregados y aún escasos, dificultando la integración de datos y la implementación de esta tecnología para investigadores, técnicos y especialistas. El objetivo de esta revisión era reunir todas las pruebas posibles relacionadas con la capacidad de los SA para estimular el metabolismo de las plantas cuando se aplican al follaje. Esta revisión abordó en primer lugar las características de la aplicación foliar y los HS. Posteriormente, los estudios se organizaron por grupos de plantas: hortalizas, gramíneas, leguminosas, frutales, oleaginosas y plantas medicinales y ornamentales. Independientemente del grupo de plantas, la aplicación foliar de SA estimuló parámetros como la biomasa y la altura de la planta y aumentó los niveles de pigmentos fotosintéticos y la productividad agrícola. La aplicación foliar promovió la protección frente a eventos de estrés, aumentando la actividad de las enzimas peroxidasa (POX), catalasa (CAT) y fenil alanina amonio liasa (PAL). La calidad del fruto también mejoró con la aplicación foliar de SA, especialmente el contenido total de azúcar y la cantidad de aceite, proteína y fibra, entre otros. Basándonos en esta revisión, proponemos estudios que integren nuevas formas y tecnologías de aplicación foliar de SA a las plantas. Son necesarios experimentos con diversas fuentes de origen, tipos de plantas y ambientes para estandarizar las formas de aplicación de estos compuestos. Así, concluimos que los SA son una tecnología viable, respetuosa con el medio ambiente y muy accesible para pequeños agricultores y agricultores familiares.

2023 Los autores. Producción y alojamiento por Elsevier B.V. en nombre de la Universidad Rey Saud. Este es un

Artículo de acceso abierto bajo licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Contenido

1. Introducción.....	494
2. Fertilización foliar	494
3. Las sustancias húmicas y su acción en las plantas.....	496
4. Aplicación foliar de SA a las plantas.....	498
4.1. Aplicación foliar de HS en hortalizas.....	499
4.2. Aplicación foliar de HS a gramíneas.....	501
4.2.1. Aplicación foliar de HS a las leguminosas	503
4.2.2. Aplicación foliar de SA a frutales.....	504
4.2.3. Aplicación foliar de HS a semillas oleaginosas y plantas medicinales.....	505
4.2.4. Aplicación foliar de HS a plantas ornamentales	507

* Autor correspondiente en: Universidad Federal Rural de Río de Janeiro.
Dirección de correo electrónico: cg.andres@gmail.com (A. Calderín García).

5. Conclusiones.....	508
Contribuciones de los autores	509
Declaración de conflicto de intereses.....	509
Agradecimientos	509
Referencias	509

foliares como radiculares se debían a la adaptación a un estrés leve que está regulado principalmente por la acción de ácido jasmónico.

Así pues, se ha establecido el efecto de los SA en las plantas cuando se aplican por vía foliar. La aplicación foliar es un método de fertilización ampliamente utilizado como alternativa a la aplicación al suelo de fertilizantes.

1. Introducción

La erradicación del hambre, la inseguridad alimentaria y todas las formas de malnutrición es uno de los mayores retos de la humanidad. Se estima que en 2020, entre 720 y 811 millones de personas pasarán hambre en el mundo y que más de 2.000 millones de individuos no tendrán acceso a una alimentación adecuada; ambos valores indican aumentos significativos en comparación con los de encuestas anteriores, y esta situación se ve exacerbada por el aumento de la población mundial hasta alcanzar los 8.000 millones de personas en 2022 (FAO, 2022). Por lo tanto, es esencial adoptar prácticas agrícolas modernas capaces de satisfacer esta demanda de alimentos, utilizando enfoques más sostenibles que reduzcan la degradación del suelo y la contaminación del agua (Cristofano et al., 2021; Lipper et al., 2014). Los bioestimulantes vegetales, como los aminoácidos y los ácidos húmicos, se encuentran entre los enfoques más eficaces a este respecto (Souri y Hatamian, 2019; Amiri Forotaghe et al., 2022; Najarian et al., 2022).

Las sustancias húmicas (SHs) son materiales derivados de la descomposición de residuos vegetales, animales y microbianos y de la actividad metabólica de los microorganismos del suelo, que c o r r e s p o n d e n aproximadamente al 80% de la materia orgánica del suelo (MOS), y también se encuentran en ambientes acuáticos y en la atmósfera (Amador et al., 2018). Se sabe que estos compuestos tienen propiedades bioestimulantes y son utilizados por los agricultores para reducir el uso de agroquímicos y utilizar más eficientemente los nutrientes para lograr una producción de alimentos más sostenible (Monda et al., 2021). Esto se debe principalmente a que pueden interactuar con las plantas de forma positiva o negativa, estimulando o inhibiendo su desarrollo, lo que también se conoce como bioactividad HS. Estas sustancias afectan beneficiosamente al ciclo vital de las plantas a través de su papel en el desarrollo de raíces y hojas, el aumento de la absorción de nutrientes y la regulación de enzimas fundamentales para el metabolismo de las plantas. En particular, el potencial bioactivo de los SA depende de factores como la especie que recibe los SA, el órgano tratado con los SA, la edad de la planta, la dosis recomendada de SA, la fuente de materia orgánica de la que se extrajeron los SA y las características fisicoquímicas específicas de los SA (Zandonadi et al., 2014). La acción estimulante de los HS está bien reconocida en la literatura científica. La bioactividad que los SA ejercen sobre las plantas depende en gran medida de las características estructurales de los SA y se produce inicialmente a través de interacciones químico-físicas con el sistema radicular de la planta (Asli y Neumann 2010). Tales interacciones HS-raíz promueven la obstrucción de los poros y modifican su funcionamiento, creando una percepción de estrés leve llamado "eustress" en las plantas. Bajo esta condición fisiológica, las plantas regulan los niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS) a través de la síntesis de enzimas redox. Este mecanismo de acción promueve el crecimiento de las raíces en las plantas y las protege contra el estrés (García et al., 2016; Castro et al., 2021, 2022). Estudios conducidos por de Hita et al. (2020) mostraron que los efectos beneficiosos de los HSs cuando se aplican tanto a tejidos

izante, contribuyendo así a una agricultura más sostenible desde el punto de vista medioambiental. Esta práctica se ha utilizado para aplicar macro y micronutrientes, así como bioestimulantes y fertilizantes húmicos, favoreciendo la asimilación y el uso de nutrientes por las plantas y aumentando el rendimiento y la calidad de los cultivos (Manuel-Tejada et al., 2018). El uso de extractos de compost enriquecidos con HS es una herramienta económicamente importante para la pulverización foliar, especialmente cuando la absorción de nutrientes del suelo se ve afectada, como en condiciones calcáreas debido a la precipitación de nutrientes. Sin embargo, este tipo de fertilización está limitada a determinadas condiciones climáticas, ya que las altas temperaturas, las precipitaciones y el viento reducen su eficacia. Del mismo modo, las altas tasas de aplicación pueden dañar las plantas, por ejemplo por quemaduras en las hojas debido a la concentración de sales tras la evaporación del agua (Jindo et al., 2020).

Los HS tienen la capacidad de proteger a las plantas frente a estreses abióticos y bióticos, así como de estimular su crecimiento y desarrollo, propiciando aumentos en el rendimiento y la producción agrícola (Perminova et al., 2019). El uso de HS en fertilizantes y bioestimulantes vegetales ha crecido en los últimos años y forma parte de la fitotecnia y el manejo actual de diversos cultivos en varias partes del mundo (Olk et al., 2018). A pesar de este escenario, aún es necesario comprender los modos de acción y los mecanismos de regulación que gobiernan las acciones de las plantas cuando los HS y los fertilizantes basados en HS se aplican vía foliar. La mayoría de los estudios actuales son incompletos y aún insuficientes, lo que dificulta el avance de la investigación y la comprensión de especialistas y técnicos en los campos y áreas en cuestión. Así, la presente revisión pretende identificar y consolidar los principales resultados obtenidos en estos estudios de aplicación foliar de SA en los más diversos cultivos de interés económico, ya sea en experimentos de campo o en invernaderos. Para este estudio, las especies fueron separadas en los siguientes grupos: hortalizas, gramíneas, leguminosas, frutas, oleaginosas y plantas medicinales y ornamentales. Así, se llevó a cabo una evaluación general de la capacidad de la SA para mejorar el desarrollo y el crecimiento de las plantas mediante pulverización foliar y, en función del nivel de protección contra el estrés de la SA, se determinaron las dosis y los tiempos de aplicación ideales.

2. Fertilización foliar

La capacidad de las plantas para absorber agua del medio ambiente a través de sus hojas se conoce desde hace aproximadamente trescientos años. Sin embargo, la absorción de nutrientes y sus efectos fisiológicos no se demostraron hasta el siglo XIX, como a través del trabajo pionero de Gray en 1843, quien evaluó la aplicación foliar de solución nutritiva como alternativa de fertilización de la vid (Fernández et al., 2013). Paralelamente a estos estudios, también se avanzó en el conocimiento de la estructura superficial de las hojas (Brongniart 1834; von Dohl 1947). Durante la segunda mitad del siglo XIX se publicaron estudios sobre el intercambio gaseoso, la transpiración, la anatomía y la fisiología de las hojas (Boussingault 1868; Merget 1873; Sachs 1884, van Wissenlingh 1895). En el siglo XX, los investigadores utilizaron técnicas con isótopos radiactivos combinadas con microscopía electrónica

La técnica de fertilización foliar consiste en suministrar nutrientes directamente a las hojas mediante la pulverización de una solución que contiene uno o más elementos nutritivos esenciales para el desarrollo de la planta que deben ser distribuidos a las otras partes de la planta (Mocellin 2004; Fernández et al., 2013). Este método se considera rápido y eficaz para superar la desnutrición de las plantas, ya que les suministra nutrientes con mayor facilidad en comparación con la aplicación al suelo (absorción a través de la raíz) (Fageria et al., 2009). Sin embargo, la fertilización foliar no debe sustituir completamente a la fertilización del suelo, sino que debe ser una técnica complementaria que se realice en periodos críticos de alta demanda de las plantas o cuando los nutrientes del suelo no estén disponibles (Nachtigall y Nava 2010).

Uno de los factores que influyen en el rendimiento de la fertilización foliar son las características de la propia planta, especialmente de las hojas. Las superficies de las hojas suelen estar cubiertas por cutículas, que son tejidos de recubrimiento compuestos por biopolímeros hidrófobos que bloquean la pérdida de humedad (Kritzinger y Lötze 2019). Las cutículas pueden tener ceras incrustadas (intracuticulares) o depósitos en su superficie (epi-cuticulares), y sus principales polímeros son la cutina y la cutícula, que se encuentran en proporciones variables dependiendo de la especie vegetal (Jeffree 2007). Debido a estos componentes, la cutícula presenta una compleja red de ácidos grasos interesterificados (C_{16} y/o C_{18}), además de n-alcoholes ($C - C_{2040}$), n-aldehídos y n-alcanos (constituyentes de las ceras) (Fernández et al., 2013).

Debido a esta característica hidrofóbica de las superficies foliares, la permeabilidad cuticular es necesaria para el flujo de la solución nutritiva. Además, las cutículas se componen generalmente de tres capas: la capa más externa, donde predominan las ceras epicuticulares; la capa matriz de biopolímeros (cutina y/o cutánea) y ceras intracuticulares; y la capa más interna, que contiene, además de los biopolímeros mencionados, polisacáridos de las paredes celulares de las células epidérmicas. Las láminas intermedias y las capas de pectina se encuentran justo debajo de esta capa cuticular más interna, de manera que cierta cantidad de fibrillas de polisacáridos y láminas de pectina se extienden desde la pared celular, conectando este tejido subyacente con la cutícula (Fernández et al., 2013). Así, se produce un aumento gradual de las cargas negativas de la cera epicuticular hacia la capa de pectina, lo que crea un gradiente electroquímico y puede provocar el movimiento de cationes y moléculas de agua (Franke 1967). Existe un área de estudio que considera la posible presencia de "poros acuosos" derivados de la absorción de moléculas de agua por unidades polares de la cutícula, lo que explicaría la penetración de solutos hidrofílicos. Sin embargo, no se han encontrado evidencias que apoyen esta teoría (Fernández et al., 2013).

Existen diferentes estructuras en las superficies de las plantas (estomas, tri- y lenticelas) que también pueden absorber soluciones nutritivas y otras sustancias químicas. Los estomas son pequeños poros especializados formados por dos células protectoras, cuya dinámica de apertura y cierre controla el intercambio de gases entre la hoja y la atmósfera (Gerardin et al., 2018; Huang et al., 2020). Los tricomas son apéndices unicelulares o multicelulares que sobresalen de la epidermis (Bustamante-Eguiguren et al., 2020) y pueden facilitar la absorción de nutrientes debido a su baja cutinización (Tagliavini y Toselli 2005). Las lenticelas son estructuras epidérmicas macroscópicas que pueden encontrarse en tallos, pedicelos o frutos y que también pueden absorber soluciones aplicadas a las partes aéreas de las plantas (Fernández et al., 2013). Evaluando la posible absorción a través de los estomas de soluciones acuosas, (Burkhardt et al., 2012) confirmaron la ocurrencia de este proceso, ya que la superficie abaxial (estomática) de las hojas de manzano

absorbía más que la superficie adaxial (no estomática). En el mismo sentido, (Schreel y Steppe 2020), una revisión sobre la absorción foliar de agua por varios grupos de plantas destacó el papel fundamental de los estomas para permitir la entrada de agua y otros solutos en las células vegetales. Los dos estudios citados anteriormente también hacen hincapié en la influencia que ejercen las partículas de aerosol (por ejemplo, sales higroscópicas) depositadas de forma natural en la superficie de las hojas sobre la humectación de las hojas y la absorción de agua.

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz-Louro Barbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al. Estas sustancias, al sufrir ciclos repetidos de delicuescencia (absorción de humedad del aire hasta formar una solución) y eflorescencia (pérdida de agua a la atmósfera), pueden provocar el desarrollo de finas películas de agua sobre la superficie hidrófoba de las hojas. Estas partículas higroscópicas son capaces de modificar la hidrofobicidad cuticular y la tensión superficial del agua, permitiendo una mayor humectación de la superficie foliar y favoreciendo la absorción de agua y nutrientes. (Burkhardt et al., 2012).

Además de la deposición natural de sustancias higroscópicas en la superficie de las hojas, la humectación y la absorción de soluciones nutritivas en estos órganos aéreos también pueden potenciarse mediante la adición de coadyuvantes en la solución fertilizante que se aplica, también conocidos como adyuvantes. Existen varios tipos de estos productos que se clasifican según su modo de acción: surfactantes (reducen la tensión superficial), adhesivos (aumentan la retención de la solución, asegurando una mayor resistencia a la lluvia), penetrantes (aumentan la velocidad de penetración foliar, "solubilizando" las cutículas), humectantes (retardan el secado de la solución al disminuir el punto de delicuescencia de la formulación sobre la hoja), entre otros (Fernández et al., 2013). Rodrigues et al. (2020) evaluaron la aplicación foliar de nitratos de lantano (La) y cerio (Ce) en soja y encontraron que la adición del surfactante Triton HW 1000 al 0,01% redujo el ángulo de contacto de las gotas en ambas caras de las hojas, aumentando la mojabilidad. Debido a esta mayor eficacia en la humectación de las superficies de las hojas y la absorción de fertilizantes por las plantas, los coadyuvantes también contribuyeron a reducir los impactos medioambientales negativos, dado el uso de menores cantidades de ingredientes activos en las formulaciones y el hecho de que la mayor parte del producto aplicado es realmente utilizado por las plantas (Kovalchuk y Simmons 2021).

A pesar de las ventajas de la fertilización foliar, es difícil predecir las respuestas de las plantas, ya que la eficacia de este procedimiento depende de varios factores, como la especie vegetal en cuestión, la composición de la cutícula foliar, el momento de la aplicación, los aspectos fenológicos y las condiciones ambientales (Portu et al., 2015). Según Fageria et al. (2009), para que la absorción foliar sea eficiente, es esencial que los estomas estén abiertos y que la temperatura no sea demasiado alta para evitar daños como quemaduras foliares. Del mismo modo, estos autores recomiendan que las aplicaciones no se realicen en días ventosos y lluviosos hasta 4 h después de la pulverización, lo que afectaría a la humedad del follaje. del Amor y Cuadra-Crespo (2011) trabajaron con plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L., cv. Herminio) y pusieron de manifiesto la influencia de la temperatura en la respuesta antioxidante de la planta tras la aplicación foliar de urea. El momento de la pulverización también puede ser un factor determinante en el éxito de esta técnica de fertilización. Analizando la aplicación foliar de manganeso (Mn) al pepino (*Cucumis sativus* L.) para aumentar la resistencia contra el mildiu polvoroso (enfermedad fúngica causada por el hongo *Podosphaera fuliginea*), Eskandari y Sharifnabi (2020) encontraron que el intervalo más corto entre la pulverización de nutrientes y la inoculación del patógeno dio lugar a la máxima eficacia de la fertilización. Portu et al. (2015) estudiaron la producción de compuestos fenólicos en uvas tras la fertilización foliar con urea y destacaron que las respuestas de la planta estaban relacionadas con el tiempo de aplicación ya que la acumulación de dichos compuestos se intensificaba tras la maduración, cuando el crecimiento vegetativo es más lento, favoreciendo esta mayor reserva de metabolitos secundarios.

Froni et al. (2021) evaluaron la influencia de *Ascophyllum nodosum*, un alga parda, en vides sometidas a estrés hídrico progresivo, comparando dos métodos de aplicación: foliar y al suelo. Estos autores encontraron que las dos formas de tratamiento tenían resultados contrastados, siendo la

pulverización foliar más efectiva que la aplicación al suelo, preservando la integridad del aparato fotosintético y restaurando más rápidamente la función fisiológica de la hoja durante el periodo de rehidratación. De forma similar, Zhou et al. (2021) estudiaron el efecto de las aplicaciones foliares y al suelo de selenio (Se) y silicio (Si) para reducir la toxicidad del cadmio (Cd) en variedades de trigo (*Triticum turgidum* L.). La aplicación al suelo de Si y Se fue eficaz en el control-

ling Cd concentrations in both varieties, while the foliar method was successful for only one variety. Estos resultados se debieron a la regulación de los genes transportadores de Cd y a la mejora de la actividad de las enzimas antioxidantes. Por otro lado, Boldrin et al. (2013) concluyeron que la aplicación de Se al suelo era más eficaz que la aplicación foliar para aumentar las concentraciones de Se en los granos de arroz.

Otra forma de realizar la fertilización foliar de los cultivos es utilizando SA, que son materiales orgánicos estructuralmente irregulares ampliamente pre sentados en suelos, ríos, océanos y sedimentos, además de recursos naturales relacionados con el carbón (turba, leonardita y lignito) (Jung et al., 2021). Tales sustancias son compuestos formados por la transformación química y biológica de residuos animales y vegetales a través de la acción de microorganismos del suelo y tienen la capacidad de promover el crecimiento de las plantas y la asimilación de los principales nutrientes requeridos por las plantas, tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) (Leite et al., 2020). Sin embargo, debido a su gran complejidad estructural, la naturaleza de los HSs aún no está clara, por lo que la relación entre sus efectos beneficiosos sobre las plantas y su estructura molecular ha sido objeto de numerosos estudios que incluso han producido resultados contrapuestos (Pizzeghello et al., 2020). Así, a continuación se discuten las principales formas de acción de los HSs sobre el desarrollo de las plantas, y se presentarán los resultados de los estudios que evaluaron su aplicación foliar a diferentes cultivos (Fig. 1).

3. Sustancias húmicas y su acción en las plantas

Los SA consisten en mezclas complejas de materiales orgánicos heterogéneos presentes de forma natural en suelos, aguas y sedimentos (Stevenson 1994) que han sido ampliamente transformados desde su producción, por ejemplo, por las plantas (Tranvik 2014). Operativamente, pueden separarse y clasificarse en las siguientes fracciones: ácidos fúlvicos (AF, solubles en pH ácido y alcalino), ácidos húmicos (AH, insolubles en pH ácido y solubles en pH alcalino) y humina (insoluble en pH ácido y alcalino) (Stevenson 1994).

Los HS se forman a través de un proceso conocido como humificación, un proceso heterogéneo y complejo, en el que se producen reacciones de transformación químicas, bioquímicas, y enzimáticas en los suelos y en los sistemas naturales, descomponiendo y creando las condiciones para la forma-

ción de nuevas estructuras químicas con mayor estabilidad que sus precursoras. El proceso de humificación depende de las características químicas y estructurales de las moléculas incorporadas al suelo y del grado en que se produce este proceso. La tasa de humificación está regulada por las condiciones ambientales, es decir, la humedad del suelo, la composición mineralógica y la cantidad y diversidad de la biota del suelo. Por tanto, la humificación producirá los HS específicos de cada entorno en el que se formen. Así, un HS tiene un único núcleo estructural con un nivel de organización supramolecular, específico y común a este grupo de compuestos, pero con cantidades relativas variables de estructuras en su composición (Aguiar et al., 2022).

El modelo estructural supramolecular aplicado a los HS parece explicar mejor las propiedades químicas y las funciones de los HS en el medio ambiente. En el modelo estructural supramolecular, los HS están compuestos por pequeñas moléculas heterogéneas que se disponen en estructuras de moléculas más grandes y están unidas por interacciones intermoleculares débiles, interacciones de van de Waal, interacciones hidrofóbicas...

interacciones (π - π , CH- π) y enlaces de hidrógeno (Piccolo 2002, Nebbioso et al., 2014). La estructura de los HS en una organización supramolecular se considera estable en el suelo, donde estos compuestos se organizan con un dominio superficial formado por estructuras polares e hidrofílicas, que implica un dominio dispuesto hacia el interior de la estructura con características aromáticas e hidrofóbicas (Fischer 2017). La modelización química computacional ya ha demostrado que la formación de estructuras supramoleculares se produce en el suelo y comienza con una absorción en las superficies reactivas de la fracción mineral del suelo de moléculas más pequeñas o subagregados moleculares parciales que sirven de base para la formación de agregados multimoleculares más grandes (Gerzabek et al., 2022) (Fig. 2).

Los HS tienen la capacidad de mejorar el estado nutricional de las plantas de diferentes maneras: aumento de la expresión de isoformas de genes que codifican para las bombas de protones de la membrana plasmática (PM H⁺-ATPasa) de las raíces y aumentan su actividad (Tavares et al., 2017; Zandonadi et al., 2007); promoción del transporte de iones a los tejidos de la planta; regulación de la expresión de genes que codifican los principales transportadores de nutrientes en las raíces; y aumento de la actividad de enzimas que afectan a la

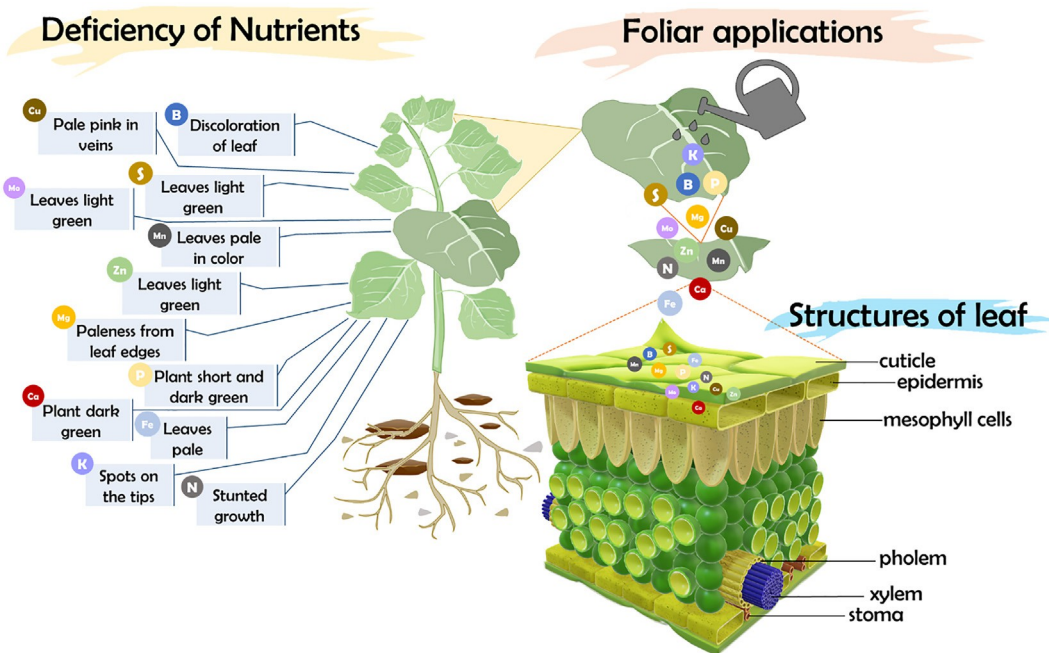


Fig. 1. Estructura de la hoja, mostrando las cutículas que cubren los tejidos hidrofóbicos. Extraído de Fernández et al. (2013).

Hay pruebas de que las SA pueden considerarse una fuente ambiental de ácido indol acético (AIA), un tipo de auxina, que es la más estudiada de las auxinas.

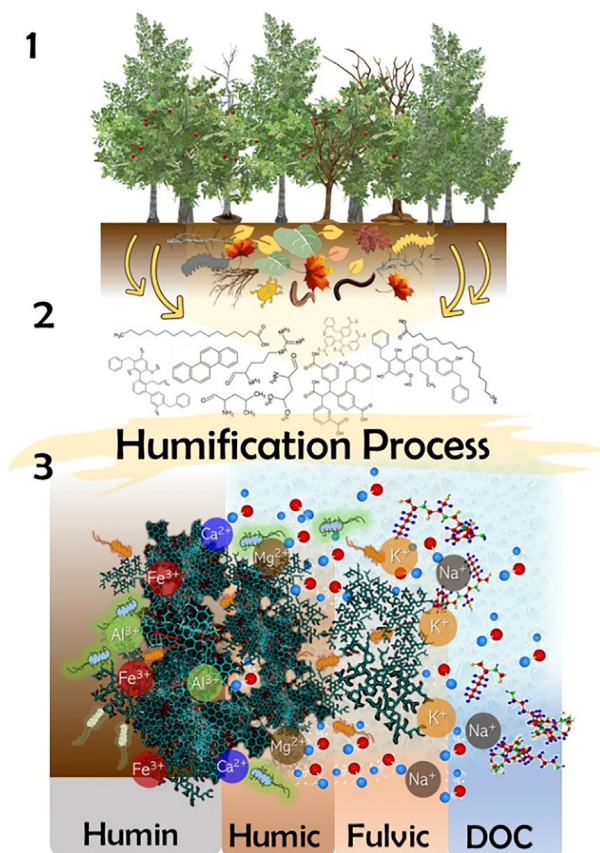


Fig. 2. Esquema ilustrativo que muestra la formación de estructuras húmicas supramoleculares a partir de la deposición de materia orgánica en el suelo. 1) Deposición de restos vegetales y animales en el suelo. 2) Incorporación de moléculas orgánicas en el suelo, productos de descomposición, y 3) formación de fracciones húmicas y carbono orgánico disuelto (Aguilar et al. 2022).

el uso de nutrientes (por ejemplo, nitrato reductasa, glutamina sintetasa, glutamato sintasa y fosfoenolpiruvato carboxilasa - PEP-caso,)(Urrutia et al., 2020). Por lo tanto, los HS actúan sobre la asimilación de nitrógeno y el metabolismo del carbono, además de la síntesis de metabolitos secundarios, como los fenilpropanoides (Zanin et al., 2019).Vaccaro et al. (2015) encontraron un efecto positivo de dosis bajas de SA sobre las actividades de las principales enzimas implicadas en la reducción y asimilación de nitrógeno inorgánico en plántulas de maíz, mientras que Leventoglu y Erdal (2014) no encontraron efectos positivos de altas dosis de SA sobre el crecimiento de las plantas y las concentraciones de nutrientes en maíz cultivado en suelos altamente calcáreos. Por su parte, Akladious y Mohamed (2018) encontraron que la dosis más alta de AH (1500 mg. kg⁻¹ de suelo) fue más efectiva que la dosis más baja (750 mg. kg⁻¹ de suelo) para aumentar los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio en plantas de pimiento (*Capsicum annum* L.) sometidas a estrés salino. Estos autores también observaron la influencia del SA en los contenidos de antioxidantes y metabolitos secundarios, como lo demuestra el aumento de los niveles de antocianina, ácido ascórbico y flavonoides totales en los brotes de las plantas de pimiento.

Debido a toda la influencia de HS en la promoción del crecimiento de las plantas,

Es una incógnita si ejercen una posible actividad hormonal. En las últimas décadas, varios estudios han demostrado esta otra posible acción de los HS en la estimulación del desarrollo de las plantas (O'Donnell 1972; Albuizio et al., 1989; Nardi et al., 1994; Varanini y Pinton 1995; Muscolo et al., 2013; Nardi et al., 2021).

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Barbara, D. França de Oliveira Torchia et al. , clase de fitohormonas que actúan en la división y expansión celular (Zandonadi et al., 2010). Se cree que los HS pueden comportarse como una auxina exógena, regulando el crecimiento y la morfología de las raíces. Esto se debe a que estos materiales humificados encierran IAA y otras moléculas con actividad similar a la IAA, que pueden ser de origen microbiano o vegetal en el suelo (Nardi et al., 2021). Además de las auxinas, en los HS se han observado actividades relacionadas con otras fitohormonas, como la citoquinina y la giberelina. Pizzeghello et al. (2013) encontraron por primera vez la presencia de isopenteniladenosina (IPA), una citoquinina, en concentraciones fisiológicamente activas en materiales húmicos de diferentes fuentes, mientras que autores como Nardi et al. (2000a, 2000b) y Pizzeghello et al. (2002) informaron de actividades similares a la giberelina en HSS. Según Nardi et al. (2018), esta acción hormonal observada en HSS razonable ya que los suelos tienen contenidos variables de auxinas, que son mayores en suelos más fértiles. Además, estos autores también afirmaron que los niveles de auxina y giberelina son, por regla general, más altos en la región de la rizosfera, posiblemente debido al aumento de las poblaciones microbianas y el metabolismo debido a la presencia de exudados radiculares. Por último, los autores subrayaron que los efectos hormonales observados no se correlacionaban necesariamente con los niveles de auxina identificados en las SA, alimentando así el debate sobre la posible presencia de diferentes compuestos de la familia de la auxina o moléculas de estructura húmica que imitan la acción o estimulan el metabolismo endógeno de esta fitohormona en las plantas.

Otro punto relevante en los estudios sobre los efectos de los HS en las plantas

crecimiento fue la acción protectora que estas sustancias confieren a las plantas frente a diversos tipos de estrés. Se han publicado muchos estudios que identifican la importancia de los AH para actuar contra el estrés causado por metales pesados (Pittarello et al., 2018; Duan et al., 2020; Haider et al., 2021), salinidad (Hatami et al., 2018; Saidimoradi et al., 2019), sequía (Khorasaninejad et al., 2018; Qiu et al., 2021) y altas temperaturas (Cha et al., 2020; Khan et al., 2020). Yildirim et al. (2021) descubrieron que la aplicación de una formulación que contenía HA y FA era eficaz para mitigar los impactos negativos causados por la acumulación de cadmio (Cd) en el berro de jardín (*Lepidium sativum* L.).

Estos autores descubrieron que el tratamiento con SA aumentaba la masa fresca y seca de raíces y brotes, el diámetro del tallo, el área foliar y el contenido de nutrientes, y reducía las actividades de las enzimas antioxidantes catalasa (CAT) y superóxido dismutasa (SOD) y aumentaba las actividades de la enzima peroxidasa (POD). Los SA contribuyen al desarrollo de las plantas en condiciones de estrés mejorando la fotosíntesis, la respiración, la permeabilidad de la membrana celular y la absorción de nutrientes como el fósforo y el potasio, además de asegurar un equilibrio hormonal (Kaya et al., 2020). La aplicación de estos compuestos humificados en situaciones de estrés también puede desencadenar una respuesta antioxidante. El estrés por metales, como el Cd, aumenta la generación de ROS, como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el anión superóxido (O_2^-) (Ozfidan-Konakci et al., 2018).

A pesar de la toxicidad causada por las ERO, estas especies químicas también tienen el potencial de actuar como moléculas señalizadoras y reguladoras. Durante el estrés abiótico, las ERO producidas señalizan cambios y regulan la expresión génica (Demidchik et al., 2007). La acción de los efectos negativos o positivos de las ROS depende del equilibrio homeostático entre la producción y eliminación de ROS que puede alterar el papel regulador de estas sustancias señalizadoras, favoreciendo los efectos negativos (Monda et al., 2021). Según García et al. (2019), las interacciones entre los fragmentos húmicos y las raíces de las plantas provocan cambios en la homeostasis redox, que regula los niveles de ROS y media la acción de los HSS en

las plantas, especialmente los mecanismos asociados al crecimiento y desarrollo radicular. Esta interacción de los HS con las raíces provoca su aglomeración en la superficie radicular, lo que conduce a la expresión de enzimas antioxidantes como la CAT y al aumento de los niveles de ROS, que actúan como intermediarios en el crecimiento de las plantas (García et al., 2012). Así, cuando se aplica al suelo o

Como bioestimulantes, los SA pueden actuar como eustresores, que son factores de estrés que desencadenan un nivel de estrés leve y transitorio en las plantas, lo que resulta en mejoras en el metabolismo y la producción vegetal (Castro et al., 2021). El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un ROS bastante estable en las plantas y difunde a través de las membranas, por lo que pequeñas concentraciones de H_2O_2 pueden resultar en la adaptación de las plantas a diversos tipos de estrés, y este proceso puede ocurrir a través de su papel como molécula señalizadora (García et al., 2012). Trabajando con la aplicación de AHs de diferentes orígenes en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.), Castro et al. (2021) observaron que inicialmente (96 h), el tratamiento con material húmico redujo el rendimiento fotosintético de las plantas. Sin embargo, después de 144 h de aplicación, hubo un aumento en la fotosíntesis, y después de 192 h, la actividad fotosintética fue restablecida, resultando en cambios en el metabolismo del nitrógeno y en el desarrollo de la planta, indicando que hubo un estado de eustresión después de la aplicación de AHs.

La acción de las SA en las plantas está directamente relacionada con la estructura de las SA (Fig. 3). Estudios realizados con 37 fracciones de materia orgánica humificada mostraron que cuando se aplican a las plantas de arroz a través de las raíces, las estructuras C-alifáticas, C-aromáticas sustituidas y C-carboxílicas en las SA son responsables del crecimiento de las raíces, mientras que en las HA, las estructuras C-alifáticas, C-aromáticas no sustituidas y C-carboxílicas son responsables de la bioactividad en las plantas (García et al., 2016). Como se ha señalado anteriormente, los HSs son capaces de estimular el crecimiento de las plantas a través del eustres, un tipo de estrés leve y beneficioso que promueve el aumento de la biomasa, mejora la nutrición de las plantas y protege contra el estrés abiótico. (García et al. 2019). Los compuestos de tipo HS obtenidos a partir de residuos de lignin mostraron que las estructuras responsables de la bioactividad en plantas de maíz son C-metoxilo y C-aromático (Savy et al., 2020). En Monda et al. (2018), los materiales húmicos más hidrofóbicos fueron activos a bajas concentraciones que a altas concentraciones, favoreciendo su adhesión a las superficies radiculares del maíz (*Zea mays* L.), y aquellos con mayor contenido en compuestos fenólicos (potenciales inhibidores de la absorción de nitrógeno) ejercieron esta bioactividad a mayores concentraciones, formando agregados supramoleculares más grandes y conformacionalmente más estables e impidiendo la liberación de estas moléculas tóxicas. En una revisión reciente de la relación entre la composición estructural y la bioactividad de los SA, Nardi et al. (2021) afirmaron que estos efectos de promoción del crecimiento vegetal dependen de factores como el origen de los SA, la dosis, el grado de hidrofobicidad y aromaticidad, y el tamaño molecular y la distribución espacial de los dominios hidrofóbicos e hidrofílicos. Los autores destacaron que los HS con tamaños moleculares más pequeños son capaces de entrar en las células de la raíz y desencadenar directamente señales intracelulares, mientras que los de mayor tamaño

tamaños moleculares pueden unirse a receptores celulares externos para inducir respuestas moleculares.

4. Aplicación foliar de SA a las plantas

Se ha demostrado que los SA tienen efectos beneficiosos en varios grupos de plantas, como hortalizas, gramíneas, leguminosas, frutas, semillas oleaginosas y plantas medicinales y ornamentales. Los efectos son diversos e incluyen cambios a nivel bioquímico, morfológico y de protección frente al estrés (Tabla 1). Debido a todos los efectos de los HSs en la promoción del crecimiento de las plantas previamente reportados, estas sustancias son ampliamente utilizadas como bioestimulantes para varios cultivos de interés agronómico. Aunque la mayoría de los estudios abordan la aplicación de estos materiales húmicos a las raíces de las plantas, otra forma de suministrar HSs es a través de su aplicación directa a las hojas (Olaetxea et al., 2018). A diferencia de los efectos de los HSs sobre las raíces (activación de la H^+ -ATPasa, transporte de iones en la membrana plasmática, respuestas hormonales, entre otros), los efectos sobre las hojas han sido mínimamente explorados, existiendo reportes de que la aplicación foliar de compuestos humificados incrementa los niveles de clorofila y actúa sobre la fotosíntesis. Además, la aplicación foliar también influye en la transpiración, aunque los mecanismos son aún inciertos, con aumentos y disminuciones en la pérdida de agua y el intercambio de gases en las hojas (Rose et al., 2014).

Los estudios realizados por Olaetxea et al. (2018) destacaron que los efectos positivos de la aplicación de HS a las hojas probablemente se regulan por mecanismos diferentes a los desencadenados por la aplicación de HS a las raíces. Estos autores también enfatizaron que es posible que el tratamiento con HS a través de las hojas en condiciones de campo también genere algún efecto en el suelo porque parte de la solución aplicada no llega a las hojas o hay un eventual escurrimiento de HS después de la aplicación a las hojas. Sin embargo, en cultivos con grandes superficies foliares y alta densidad de plantas, este hecho se hace despreciable. Además, la pulverización foliar de SA por sí sola puede estimular el desarrollo tanto de las raíces como de los brotes de las plantas tratadas, y este método tiene el potencial de ser más económico que la aplicación al suelo porque las cantidades de producto demandadas son relativamente bajas (Chen y Aviad 1990). Kishor et al. (2021) encontraron que en comparación con el tratamiento control con sólo fertilizante NPK, la aplicación combinada de AH a las hojas y al suelo, más el 100% de una dosis recomendada de fertilizante (NPK) en tres parcelas más la aspersión foliar de una mezcla de nutrientes, fue el tratamiento más eficiente y tuvo el mayor retorno económico en plantas de café, incrementando su rendimiento, así como el contenido de nutrientes en las hojas.

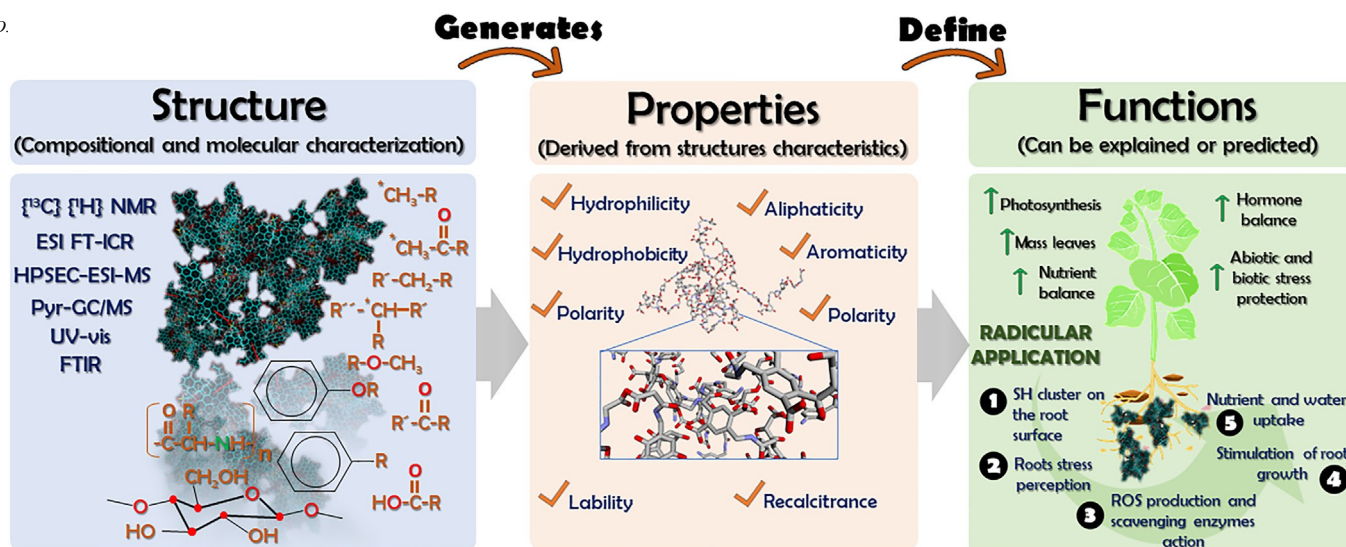


Fig. 3. Relación estructura-propiedad-función del efecto de los HS en las plantas.

Cuadro 1

Principales incrementos observados tras la aplicación foliar de sustancias húmicas en cultivos de diferentes grupos (% SST = porcentaje de sólidos solubles totales).

Grupo de plantas	VARIABLES con aumentos observados	Especies	Referencias
Frutos	Altura de la planta, Número de hojas, Peso medio del fruto, Número de frutos % SST, Rendimiento	Tomate, pimiento, pepino, berenjena	de Hita et al., 2020; Azarpour, 2012; Karakurt et al., 2009; Olivares et al., 2015
Hortalizas de hoja	Altura de la planta, Diámetro del tallo, Cogollo	Lechuga, brócoli, coliflor	Rachid et al., 2020; Raheem et al., 2018
Tubérculos dientes, Número	anchura, % Nutrientes en la hoja	Ajo, cebolla, patata	Balmori et al., 2019; Kandil et al., 2012; Man-hong et al., 2020
Gramíneas	Peso del bulbo, Pungencia de los de hojas, Rendimiento de tubérculos	Arroz, maíz, sorgo	Anjum et al., 2011; Delfine et al., 2005; Felipe et al., 1998; Osman et al., 2013.
Leguminosas	Número de macollos, Superficie radicular, Índice de cosecha, Rendimiento en grano	Trigo	
Leguminosas	Altura de la planta, Número de vainas, Peso de la semilla, Rendimiento	Judías, guisantes, soja	Basha et al., 2020; Kaya et al., 2005; Lenssen et al., 2019
Frutales	Altura de la planta, Diámetro del tallo, Contenido de clorofila en las hojas, Rendimiento de fruta	Uva, guayaba, mango Fruta de la pasión	Abdulhameed Ibrahim y Abdulali Al-Sereh, 2019; Cavalcante et al., 2013; El-Hoseiny et al., 2020; Ferrara y Brunetti, 2010.
Semillas oleaginosas medicinales	Altura de la planta, Área foliar, Fotosintética	Girasol, Colza, Menta	Deotale y otros, 2019; Lotfi y otros, 2015; Shahabivand y otros, 2018; Shindhe y otros, 2020.
Ornamental	eficiencia, % Aceite en semillas	Sésamo, Caléndula, Crisantemo, Gladiolo, Petunia	Ahmad y otros, 2013; BoogarI y otros, 2014; Hasan, 2019; Mazhar y otros, 2012*.
	Número de flores, Diámetro de la flor, Duración de la floración, Vida en maceta		

De forma similar, De Hita et al. (2020) exploraron la distinción entre los efectos de la aplicación de AH sedimentario a las hojas y a las raíces de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L. var. Ashley). Los autores encontraron importantes similitudes y diferencias entre los dos métodos de administración de AH. Ambas formas de aplicación promovieron el crecimiento tanto de los brotes como de las raíces, con aumentos de las concentraciones de IAA en las raíces y de citoquininas en los brotes. También se observó que la pulverización foliar a corto plazo reducía el número de raíces secundarias (a diferencia de la aplicación radicular) y aumentaba la longitud y la masa seca de las raíces pivotantes. Los investigadores explicaron estos resultados basándose en la concentración en la raíz de dos fitohormonas implicadas en la regulación del crecimiento radicular: IAA y ácido abscísico (ABA). Mientras que la aplicación radicular aumentó los niveles de IAA y ABA, la pulverización foliar sólo incrementó los de IAA. Aunque los contenidos de ABA en raíz disminuyeron con el aporte foliar de AH, este hecho no afectó al crecimiento radicular, como se verificó por la mayor producción de materia seca, en contraste con los resultados de Olaetxea et al. (2019), donde la aplicación de un inhibidor de la biosíntesis de ABA perjudicó el desarrollo radicular de esta misma variedad de pepino. Por lo tanto, De Hita et al. (2020) afirmaron que otros factores deben estar implicados en los efectos observados de la aplicación foliar de HA sobre el crecimiento y la arquitectura radicular. Por otro lado, esta disminución de los niveles de ABA en las raíces puede haber estado asociada al crecimiento de los brotes tras la pulverización foliar.

Otro punto destacado por De Hita et al. (2020) es que la foliación

La aplicación de HA puede haber desencadenado vías de señalización, ya que la interacción de los compuestos húmicos con la superficie de las hojas no se produce de forma natural, lo que puede inducir a las plantas a percibirlo como un estresor, activando redes de señalización como un mecanismo de defensa. En este caso, las plantas activaron las vías de señalización del ácido salicílico y el ácido jasmónico (JA). Las plantas tratadas por vía foliar mostraron un aumento de los niveles de JA y de jasmonoyl isoleucina (JA-Ile), la forma activa de la hormona, en las raíces y los brotes, mientras que la aplicación radicular de HA aumentó el nivel de esta hormona sólo en las raíces. Los autores subrayaron que estos cambios hormonales son síntomas relacionados con el estrés, asociados a la pérdida de tricomas foliares y a la disminución del tamaño de los cloroplastos,

reafirmando la hipótesis de que los efectos beneficiosos observados eran el resultado de una condición de estrés leve y transiente provocada por la aplicación de HA.

4.1. Aplicación foliar de HS en hortalizas

Las hortalizas son plantas herbáceas o subleñosas, generalmente de cultivo intensivo en ciclos cortos, y suelen cultivarse en pequeños huertos (Zárate y Vieira 2017). Son fuentes

Las plantas tuberosas son ricas en vitaminas, fibra, minerales y otros compuestos bioactivos, y su consumo se recomienda ampliamente para mejorar la salud humana; también desempeñan un papel clave en el fortalecimiento de la agricultura familiar (Faulin y Furquim De Azevedo 2003). This group of plants can be subdivided according to the parts used for human consumption; for example, the edible parts of tuberous or underground vegetables are located below the soil surface (potatoes, yams, onions, garlic, yams, cassava, beetroot, sweet potato, carrot, etc.); las partes comestibles de las hortalizas herbáceas o de hoja se desarrollan por encima de la superficie del suelo, con características de suculencia y suavidad (lechuga, col, espinaca, etc.); y la parte comestible de las plantas frutales son los frutos verdes o maduros (calabaza, tomate, pepino, melón, sandía, pimiento, etc.) (Camargo Junior et al., 2018). Muchas especies hortícolas tienen una eficiencia de uso de nutrientes relativamente baja en comparación con la de otros cultivos (Tei et al., 2020). Este escenario se traduce en un exceso de fertilización del suelo, que se ve afectado negativamente (Zandonadi et al., 2014). Por lo tanto, una agricultura más sostenible basada en insumos orgánicos, incluido el uso de fertilizantes foliares a base de SA, puede ser una solución. La lechuga (*Lactuca sativa* L.) se encuentra entre las especies vegetales más estudiadas en relación con la aplicación foliar de SA. Wang et al. (2019) evaluaron la pulverización de una solución que contenía AF en concentraciones de 0, 0,1, 0,3, 0,5, 1,0 y 2,0 g. L⁻¹ sobre plantas de lechuga sometidas a estrés por cadmio (Cd). Los autores descubrieron que el tratamiento con AF mitigaba los efectos negativos del estrés por Cd en función de la dosis, siendo la dosis intermedia de 0,5 g. L⁻¹ la más eficaz para reducir la acumulación de este metal pesado en las raíces y los brotes de las plantas. En este estudio se observó un aumento significativo del crecimiento de brotes y raíces; una mayor protección del aparato fotosintético, especialmente del fotosistema dos (PSII), frente al estrés por Cd; una reducción de la acumulación de ROS; y un aumento de la actividad de enzimas antioxidantes, como la ascorbato peroxidasa (APX) y la CAT. Además del uso de HS para proteger a las plantas contra el estrés abiótico, muchos otros estudios han encontrado mejoras en varios parámetros relacionados con el desarrollo de las plantas de lechuga. Rodrigues et al. (2018) y Santos et al. (2018) observaron que la aplicación de AH de una fuente alternativa y comercial benefició el crecimiento de plántulas de lechuga del cultivar Elba, y las mejores dosis fueron 3,0 mg. L⁻¹ (ambas fuentes de AH) en el primer estudio y 21,9 g. L⁻¹ de la fuente alternativa y 7,3 g. L⁻¹ de la fuente comercial en el segundo estudio.

de la fuente comercial en el segundo estudio.

Por su parte, Hernández et al. (2015) evaluaron la aplicación de humatos potásicos aislados del vermicompost de estiércol bovino directamente sobre las hojas del cultivar de lechuga Semilla Negra Simpson en un sistema de agricultura orgánica urbana en Cuba. Los humatos se aplicaron en concentraciones de 0, 10, 15 y 20 mg C. L⁻¹ a 10 y

15 días después del trasplante. Los autores descubrieron que, de las concentraciones de humato, 15 mg C. L⁻¹ era la más eficaz para aumentar el número de hojas por planta, reducir los niveles de carbohidratos y aumentar el contenido de proteínas y las actividades de las enzimas nitrato reductasa (NR) y fenilalanina amoniaco liasa (PAL), siendo esta última fundamental en la síntesis de compuestos fenólicos que actúan en la defensa de las plantas contra los herbívoros. También se planteó la hipótesis de que los compuestos presentes en el complejo humificado podrían actuar como inductores de la actividad PAL. Estos autores también destacaron que la aplicación de humatos directamente sobre las hojas activaba su metabolismo, acelerando el desarrollo al reducir el ciclo de producción, sin afectar a la calidad comercial de las plantas, lo que constituye un posible mecanismo de mejora de la agricultura urbana. Además de la lechuga, otras hortalizas de hoja, como el brócoli (Al-Jaf et al., 2018), la coliflor (Rachid et al., 2020), y el espárrago (Tejada y González 2003), también han sido objeto de estudios sobre la aplicación foliar de HSs, y todas las hortalizas experimentaron respuestas relacionadas con las características de desarrollo.

De entre las distintas hortalizas, los tubérculos o plantas subterráneas son otro grupo que ha sido ampliamente estudiado. Dos estudios recientes sobre la patata (*Solanum tuberosum* L.) constataron que la aplicación foliar de HS aumentaba el rendimiento de los tubérculos (Man-hong et al., 2020; Wadas y Dziugiel 2020). Sin embargo, sólo el primer estudio mostró un aumento significativo de los niveles de clorofila en condiciones de estrés hídrico en un experimento controlado en invernadero. Los autores del segundo estudio no encontraron un aumento de los contenidos de clorofila en un experimento de campo en un Luvisol e informaron de que este parámetro depende del cultivar utilizado y de las condiciones climáticas y edáficas. Por su parte, Dziugiel y Wadas (2020) realizaron un experimento similar en las mismas condiciones de campo que el estudio antes mencionado de los mismos autores Wadas y Dziugiel (2020) en tres años sucesivos, en el que la leonardita HS (12% HA y 6% FA) se pulverizó dos veces (primero en la fase de desarrollo foliar y de nuevo una semana después). Los resultados mostraron que no se produjo un aumento del número de tubérculos por planta, pero sí del peso medio de los tubérculos, lo que se tradujo en un mayor rendimiento total y comercializable. Además, estos investigadores encontraron que la aplicación de AH producía mejores resultados en la estación de crecimiento más fría con escasez periódica de agua que en la estación de crecimiento más calurosa durante el desarrollo de la patata, reafirmando el efecto de los AH relacionado con la superación del estrés hídrico, por ejemplo, reduciendo la tasa de transpiración. Por otro lado, Suh et al. (2014), evaluando la pulverización foliar de AF más la aplicación al suelo de HA en este mismo cultivo, observaron que el tratamiento directo sobre el follaje no afectó al número de tubérculos ni a su rendimiento total y composición química. Sin embargo, en este experimento se observó un aumento en el peso de los tubérculos extragrandes (mayores de 250 g), aumentando la incidencia de la enfermedad del corazón hueco, lo que llevó a los autores a afirmar que en las condiciones evaluadas no se recomienda la aspersión de AF.

El ajo (*Allium sativum* L.) y la cebolla (*Allium cepa* L.) pertenecen a del mismo género y también se clasifican como hortalizas subterráneas o tuberosas. Además, existen numerosos informes en la literatura que abordan la aplicación foliar de productos a base de SA a estas especies. En cuanto al ajo, hay estudios que muestran tanto un aumento en los niveles de macro y micronutrientes, la pungencia de los dientes (Manas et al., 2014), el peso de los bulbos, el rendimiento de dientes por bulbo y la capacidad de almacenamiento (Abdel-Razzak y El-Sharkawy 2013). Balmori et al. (2019) evaluaron los efectos de la

pulverización de un extracto húmico líquido derivado del vermicompost en un experimento de campo 45 días después de plantar las semillas de ajo. Los autores observaron un aumento de la masa externa de los dientes de ajo, además de parámetros de calidad comercial, y relacionaron estas respuestas con la estructura del material húmico aplicado, con un predominio de compuestos alifáticos como carbohidratos, péptidos y fragmentos de lignina más lábiles, que conferían el potencial de bioactividad del HS aplicado. En cuanto al cultivo de la cebolla, Kandil

O. Vioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Barbara, D. França de Oliveira Torchia et al. et al. (2012) mostraron que la pulverización foliar de AHs (4,76 L. ha⁻¹, dos veces, a los 60 y 80 días después del trasplante) proporcionó los resultados más altos para los caracteres relacionados con el crecimiento (altura de la planta, número de hojas por planta, peso fresco de la planta), proporción de follaje y bulbo), así como % de sólidos solubles totales (SST), peso del bulbo y rendimiento total y comercializable del cultivar Giza 20. Estas respuestas se atribuyeron a la acción del HS en la estimulación del crecimiento inicial de las cebollas, así como en la mayor producción de materia seca y la síntesis de productos metabólicos que son translocados a los bulbos. En una tendencia opuesta, Osvalde et al. (2013) no encontraron una influencia positiva de la pulverización foliar de un HS derivado del vermicompost (1,5 L. ha⁻¹, dos o tres veces) sobre los contenidos de nutrientes y el rendimiento de la cebolla en un experimento de campo en Letonia. Estos resultados contrastados pueden explicarse por la diversidad en el origen, composición y dosis de los SA aplicados, así como por la variabilidad ambiental y de cultivares estudiada.

Evaluando la aplicación foliar de SA en zanahorias (*Daucus carota* L.), Alhariri y Boras (2020) encontraron un aumento significativo en el crecimiento de la planta y en el rendimiento de raíces, con mayor altura de planta, planta y masa fresca de hojas y raíces, además de una mejor tasa de cosecha. Efectos positivos en este cultivo también fueron encontrados por El-Helaly (2018), donde se probó la pulverización de HA (1 g.L⁻¹) y FA (0,5 g.L⁻¹), aplicando ambos cuatro veces (a los 30, 45, 60 y 75 días después de la siembra) en cuatro cultivares diferentes. En general, en comparación con FA, HA fue más eficiente en aumentar el peso y diámetro de las raíces y el rendimiento y el índice harvest, mientras que FA fue más eficiente en aumentar el % de materia seca, carbohidratos totales, carotenoides totales, nitrógeno y fósforo en las raíces, además del contenido total de clorofila foliar. La pulverización foliar de AF (10 mg. L⁻¹) en remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) aumentó el peso, diámetro y longitud de las raíces; la relación raíz/brote; y los rendimientos biológicos de raíces, brotes y azúcar, además de los porcentajes de sacarosa, SST y pureza (Kandil et al., 2020). Además de estos parámetros, Abido e Ibrahim (2017), que aplicaron HA (1,5 mg. L⁻¹, a los 50 y 70 días después de la siembra), entre otros productos, también mostraron mayores niveles de clorofila en la hoja, área foliar y longitud, así como mayores tasas de crecimiento relativo y de hojas de cultivo.

Del grupo de las plantas frutales, el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de los cultivos con más estudios relacionados con la bioactividad de HS. Los autores Villegas-Espinoza et al. (2018) ensayaron en un experimento de campo la aplicación foliar del producto Foliar Liplant®, con 50% HA y 50% FA, a diluciones de 1/10, 1/20, y 1/30 (v/v), pulverizado a los 10 y 25 días después del trasplante de las plantas de tomate. Se observaron incrementos en los siguientes parámetros: altura de la planta, diámetro del tallo, número de frutos/planta, diámetro polar y ecuatorial del fruto, masa fresca y seca del fruto, % SST, índice de madurez, vitamina C, beneficio neto y relación coste/beneficio, siendo el tratamiento 1/30 el que proporcionó los mejores resultados. Además, Reyes Pérez et al. (2011), trabajando con el mismo producto, mismos períodos de aplicación e iguales diluciones, adicionando 1/40 y 1/50 (v/v), no observaron ninguna mejora significativa en las características evaluadas: pH, % SST, acidez, vitamina C y ácido málico. Oliveira Amatussi et al. (2020), además de las variables mencionadas anteriormente también observaron aumentos en el peso fresco y seco de la raíz, el volumen de la raíz y la longitud total de la raíz y de la raíz fina. Estos autores realizaron pulverizaciones foliares de *Lithothamnium* sp., un alga calcárea micronizada que contiene AHs, a dosis de 0, 0,75, 1,5, 2,25, y 3,0 g. L⁻¹, y la promoción del crecimiento de los brotes requirió mayores concentraciones de aplicación en comparación con la de las raíces. Se comprobó, por tanto, que estas algas pueden ser otro material a base de AH con potenciales efectos bioestimulantes sobre las plantas.

Una cuestión importante que debe abordarse para garantizar el correcto procedimiento de aplicación de fertilización foliar con bioestimulantes es el momento de aplicación de la sustancia, que debe producirse en función de la fase de desarrollo fenológico del cultivo. Por ejemplo, Alfonso et al. (2010), donde se pulverizó el producto a base de HS derivado del vermicompost Biostan (25 mg. ha⁻¹), se observó que en las condiciones experimentales, había

fueron dos los mejores momentos de aplicación para tomate: al inicio de la floración y en floración/fructificación, resultando en mejoras en el N, P y K foliar; niveles de nitrato en fruto; número de flores y frutos por planta; % SST; y rendimiento del cultivo ($t. ha^{-1}$). Del mismo modo, [AbdAllah et al. \(2018\)](#) encontraron que la solución de AF (0,15 y 0,20%) aplicada tres veces durante el período de fructificación fue eficaz para actuar pre-ventilando la transpiración, aumentando la eficiencia del uso del agua en plantas de tomate.

Otro punto interesante en relación con la aplicación foliar de HSs se refiere a sus efectos sinérgicos con bacterias promotoras del crecimiento vegetal. Por ejemplo, [Olivares et al. \(2015\)](#) observaron un aumento significativo de la masa seca radicular, las raíces y las áreas foliares, además de los niveles de PAL, las enzimas nitrato reductasa y el contenido de pro-teínas en hojas de tomate tras la pulverización foliar de humato derivado de vermicompost de estiércol bovino añadido a una suspensión de *Herbaspirillum seropedicae*, una bacteria endofítica diazotrófica. También descubrieron que los efectos combinados de la aplicación de HS con la bacteria a los 15 y 30 días después del trasplante promovían un mayor crecimiento de las plantas de tomate, lo que reflejaba un mejor rendimiento de los frutos, y aumentaba la población fijadora de nitrógeno tanto en la región de la rizosfera como en los tejidos de la raíz y las hojas. Dado que, en comparación con los productos toher, los HS son más recalcitrantes a la actividad microbiana, también pueden utilizarse como portadores de estos organismos beneficiosos en la agricultura. Estos resultados indican que el tratamiento con SA y microorganismos promotores del crecimiento vegetal es una herramienta muy útil para aumentar la agricultura sostenible ([Canellas et al., 2015](#)).

Además de los realizados en tomate, varios estudios sobre otras frutas se han centrado en el efecto de las SA aplicadas por vía foliar. Para el pepino (*Cucumis sativus* L.), hay informes de aumentos en la actividad antioxidante de los frutos, las fracciones lipófilas e hidrófilas, los niveles totales de carotenoides y xantofilas, licopeno, B-caroteno y ácido clorogénico ([Karakurt et al., 2015](#)), así como incrementos en la altura de la planta, masa seca, número de hojas/planta, longitud, diámetro y peso medio del fruto, contenido en clorofila, % N, % K, % SST, y rendimiento del fruto ([Kazemi 2013](#)). Por su parte, [Abdulbaset y Al-Madhagi \(2019\)](#) evaluaron la pulverización de HA (0, 100, y 300 $mg. L^{-1}$) y extracto de levadura (0, 2000, y 4000 $mg. L^{-1}$), aplicados solos o juntos, sobre plantas de pepino tras un mes de cultivo, y observaron un aumento en la tasa de crecimiento pero una reducción en el contenido de clorofila (SPAD); además, el mejor tratamiento con HA fue el de 100 $mg. L^{-1}$. Además de estimular el crecimiento, [Kamel et al. \(2014\)](#) encontraron que la aplicación foliar de AF, extraído de estiércol de biogás, (50, 75 y 150 $mg. L^{-1}$) fue eficaz en todas las concentraciones para controlar el mildiu y el oídio en plantas de pepino, incluso más que los fungicidas. En el cultivo de berenjena (*Solanum melongena* L.), [Ebrahim Azarpour \(2012\)](#) ensayó la aplicación foliar de HA (0, 25 y 50 $mg. L^{-1}$) más fertilizantes nitrogenados minerales y orgánicos aplicados al suelo. En este estudio, en comparación con el resto, la dosis de 50 $mg. L^{-1}$ HA fue la más eficaz para mejorar el rendimiento de frutos ($t. ha^{-1}$), el número de frutos por m^2 , el número de ramas/plantas, la altura de la planta (cm), y la longitud y anchura del fruto (cm). Muchos estudios sobre el cultivo del pimiento (*Capsicum annum* L.) han indicado aumentos del crecimiento (altura de la planta, número de frutos/plantas, número de ramas/plantas, etc.) y del rendimiento ([Yasar Karakurt et al., 2009](#); [Fathima y Denesh 2013](#), [Jan et al., 2020](#)) (Fig. 4).

4.2. Aplicación foliar de HS a las gramíneas

Las gramíneas (familia Poaceae o Gramineae) son una de las

mayores familias de angiospermas, con más de diez mil especies, y están representadas por las plantas comúnmente llamadas gramíneas y bambúes. Este grupo de plantas es de gran importancia para el ser humano, especialmente como fuente de alimentos, como refleja la estimación actual de que aproximadamente el 70% de la tierra cultivable de la Tierra (o 70 millones de hectáreas) se destina al cultivo de cereales (maíz, trigo, avena, arroz, etc.).

Q. Fiorati Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbaça, D. Franca de Oliveira Torchia et al. Además, las especies de esta familia también proporcionan cobertura al suelo para protegerlo contra procesos erosivos (Filgueiras 2021). Otro aspecto relevante del uso de gramíneas, además del uso de especies de leguminosas (familia Fabaceae), como plantas forrajeras tropicales en pasturas, es su capacidad de servir como base alimenticia para rumiantes, como plantas perennes capaces de brotar después del corte y/o pastoreo (Souza et al., 2018).

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cultivos más importantes del mundo, ya que sirve de alimento a más de la mitad de la población mundial y es esencial para el mantenimiento de la seguridad alimentaria. En las últimas décadas, la producción mundial de arroz ha aumentado significativamente, en gran parte debido a las mejoras en las tecnologías de cultivo (Fu et al., 2021). Por ello, existen numerosos estudios sobre la biofertilización del arroz con HSs. Los estudios realizados por Osman et al. (2013) probaron la aplicación foliar de HA, FA, o ambos (HA + FA) (5 g. L⁻¹) en adición a la fertilización nitrogenada con urea y amoníaco anhidro aplicada al suelo a los 20 y 35 días después del trasplante de Giza

101 plántulas de arroz. Se observaron incrementos en el número de macollos/m²; peso de 1000 granos; rendimiento de grano y paja; contenidos de N, P, K, nitratos y nitritos; y rentabilidad, obteniéndose las mejores respuestas del tratamiento combinado HA + FA más amoníaco anhidro. Por su parte, Hernández et al. (2018) evaluaron la pulverización foliar de HA derivado de vermicompost de estiércol bovino (0, 30, 34 y 38 mg. L⁻¹) aplicado a 3 mL/planta a los 32 días después de la germinación de dos cultivares de arroz (Jucarito104 e IACuba-33) en fase de ahijamiento activo bajo condiciones de estrés hídrico y sin estrés hídrico. Los autores observaron efectos positivos del AH, evidenciados por aumentos en la altura de la planta, la masa seca radicular, la actividad de la enzima peroxidasa (POX) y los niveles de proteína soluble total en ambas condiciones hídricas. Las dosis más altas (34 y 38 mg. L⁻¹ de AH) proporcionaron los mejores resultados. Los autores plantearon la hipótesis de que el posible efecto protector de la HA frente al déficit hídrico podría desarrollarse a través de una acción similar a la del ABA de la HS, que imitaría la acción de esta hormona.

La acción protectora de los AF también se observó en el maíz (*Zea mays* L.), donde la aplicación foliar de AF (1,5 mg. L⁻¹, 25 mL pulverizados) a plantas sometidas a estrés hídrico mejoró el crecimiento y las características fisiológicas de estas plantas. El malondialdehído (MDA) es un producto de la peroxidación lipídica (Anjum et al., 2011). Relativamente, Khaled y Fawy (2011) aplicaron una solución de AH vía foliar (0, 0,1 y 0,2%) y pulverizada en 5 L de agua desionizada a los 20 y 40 días de la emergencia de las plántulas de maíz, así como la aplicación de AH al suelo (0, 2 y 4 g. kg⁻¹), y ambas situaciones aumentaron el estrés salino. Las dos formas de AH atenuaron el estrés salino, incrementando el peso seco y los contenidos de macro y micronutrientes, especialmente desde las dosis más bajas (0,1% foliar y 2 g. kg⁻¹ al suelo) hasta las más altas, reduciéndose los efectos beneficiosos. Los trabajos de Canellas et al. (2005) estudiaron la influencia de la aplicación foliar de HA junto con la suspensión de *H. seropedicae* (50 mg. L⁻¹ y 450 L. ha⁻¹) en experimentos de campo y encontraron que la pulverización mejoraba el rendimiento de grano (especialmente en épocas de sequía) y la biomasa de raíces y brotes.

En cuanto al trigo (*Triticum aestivum* L.), muchos estudios también han

evaluaron la aplicación foliar de materiales a base de AF. Xudan (1986) aplicó soluciones de AF (0,01 y 0,05%) a este cultivo y encontró una mayor resistencia al estrés por sequía en las plantas tratadas, reduciendo la transpiración a través de un mayor cierre estomático. Tales efectos también fueron reportados posteriormente por Dziugiel y Wadas (2020) para el cultivo de papa, y observaron un incremento en el agua, clorofila, absorción de P, número de granos y porcentaje de espigas fértiles comparados con los de plantas de trigo no tratadas. En otro

estudio, se pulverizó HA (0, 0,1 y 0,2%) sobre las hojas de trigo a los 20 y 35 días después de la emergencia de las plántulas en 5 L de agua desionizada y se pulverizó directamente sobre el suelo (0, 1, y 2 g. kg⁻¹), con ambos HA derivados de leonardita, y el suelo del experimento presentaba condiciones calcáreas, con adición de cantidades crecientes de cal. Se observó que el aporte de AH limitó la disminución del peso seco y de la absorción de nutrientes causada por el exceso de cal aplicada (Katkat et al., 2009).

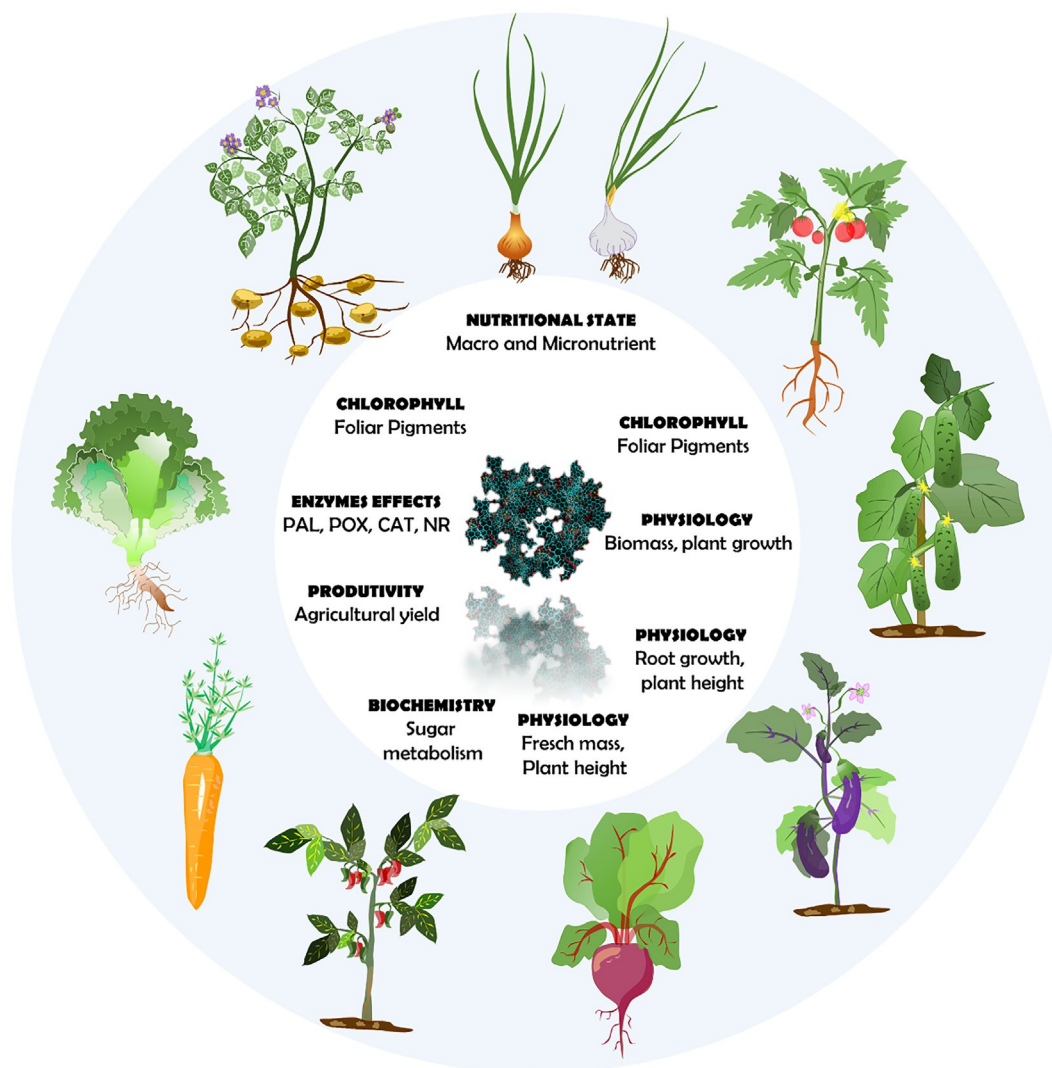


Fig. 4. Efectos principales de la aplicación foliar de HS en hortalizas.

En este cultivo también se observaron efectos positivos de la aplicación foliar de solución de AF, tanto en términos de una mayor biodisponibilidad y concentración de zinc (Zn) en los granos, con la formulación líquida de AF al 0,1% (m/v)(Wang et al., 2020), y en una reducción en la absorción y acumulación de cromo (Cr), con mayores actividades de enzimas antioxidantes, niveles de pigmentos fotosintéticos y biomasa vegetal, tras la pulverización en las etapas de ahijamiento e inicialización con una solución de AF a 1,5 mg. L⁻¹ (Ali et al., 2015). Delfine et al. (2005) mostraron que aunque la aplicación foliar de extracto húmico mejoró algunos parámetros del trigo duro (*Triticum durum* L.), como el rendimiento de grano, el número de granos por espiga, el contenido de proteínas foliares y otros, fue menos eficaz que la aplicación fraccionada de N al suelo.

En Abdulsattar y Fahdawi (2020), el efecto de la pulverización foliar de un producto a base de AH (0, 250, 500 y 750 mg. L⁻¹) en cebada (*Hordeum vulgare* L.) que se aplicó dos veces mostró efectos un mes después de la siembra y al inicio de la antesis. Estos autores también utilizaron diferentes espaciamientos entre las hileras de cultivo. Se comprobó que la aplicación de HA era útil en las condiciones de este experimento, resultando en un aumento del número de espigas/m², granos/año, rendimiento biológico y de grano e índice de cosecha, además de una reducción del peso del grano. En general, la dosis intermedia de 500 mg. L⁻¹ fue la más

eficaz en combinación con una separación entre hileras de 15 cm. Pruebas de fertilización foliar HS en avena (*Avena*

O. Viorati, Telles de Mouga, R. Luiz Louro Berbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al. *sativa* L. cv. Shaffaa) en un experimento de campo, durante las etapas de ahijamiento y floración al 50%, [Alabdulla \(2019\)](#) observó que los tratamientos con HA (0, 3, 6 y 9 g. L⁻¹) incrementaron el número de panículas/m², granos/panículas, % N, %P, %K y proteína cruda en base a materia seca y los rendimientos de grano y forraje, además de reducir el peso de 1000 granos. Hubo una influencia de los momentos y dosis aplicadas, y los mejores resultados se obtuvieron de la pulverización en la fase de ahijamiento, donde las mejores dosis fueron 6 g. L⁻¹ para el rendimiento en grano y 9 g. L⁻¹ para el % nutricional. En otro estudio, se realizó la aplicación foliar de un HS en sorgo (*Sorghum bicolor* L.), donde se suministró el producto Humitron (0,125%) dos veces, cuando las plantas alcanzaron los 30 cm de altura y antes de la emergencia de la panícula, tal como se recomienda para esta especie, en condiciones salinas. Se observó una mejora en el crecimiento y rendimiento del sorgo en función del HS, con incrementos en la altura de la planta, área foliar, peso seco, peso seco de la panícula, índice de cosecha y potencial osmótico ([Santoyo et al., 1998](#)).

Además de los estudios sobre cultivos de cereales, también hay informes de pulverización foliar de AH en gramos. Por ejemplo, [Maibodi et al. \(2015\)](#) probaron la influencia de un AH de leonardita (0, 100, 400, y 1000 mg. L⁻¹), pulverizado mensualmente durante 6 meses, sobre rye-grass perenne (*Lolium perenne* L.), una especie forrajera de invierno. Los autores descubrieron que el SA aumentaba el contenido de N y hierro (Fe) en las hojas y el diámetro, la longitud y la superficie radicular en condiciones de baja HA

además de la altura de la planta y una mejor calidad visual bajo altas concentraciones de AH, sin afectar el contenido de clorofila. Resultados similares y diferentes fueron obtenidos por Ervin et al. (2008) para la especie *Poa pratensis* L. ("Kentucky Bluegrass"), otro cultivo perenne de invierno, donde se aplicó AH derivado de turba (47 g. m²) y leonardita (58 g. m²) a las hojas 6 (seis) veces durante 12 (doce) semanas (una vez cada dos semanas), a una tasa de 375 L. ha⁻¹, en Blacksburg, Virginia, EE.UU., donde hay un clima continental templado. En este estudio, ambas fuentes de AH mejoraron la resistencia (kg. m³) y la masa radicular (mg. m³), pero no afectaron a la calidad visual, a diferencia de lo ocurrido en un estudio anterior con raigrás perenne o en un estudio sobre eficiencia fotoquímica y densidad de macollos. Los investigadores atribuyeron esta falta de efectos a una mayor senescencia foliar debida a diversas heladas en el período inicial del experimento.

Por su parte, Cooper et al. (1998) estudiaron la especie *Agrostis stolonifera* L. ("creeping bentgrass"), también una planta perenne de invierno muy utilizada en campos de golf porque tolera cortes cercanos al suelo. Estos autores descubrieron que la aplicación foliar de AH derivados del suelo, turba y leonardita y de un producto soluble comercial (100, 200 y 400 g. L⁻¹, pulverizados 3 veces) tenía efectos muy limitados en relación con el humato granular que se aplicaba al suelo, sin alterar la longitud ni la masa radicular ni los contenidos nutricionales. Según estos investigadores, tales resultados se debieron a que los humatos granulares entraron en contacto directo con las raíces, induciendo así un mayor crecimiento radicular en comparación con el AH aplicado directamente sobre las hojas (Fig. 5).

4.2.1. Aplicación foliar de HS a las leguminosas

Las leguminosas (familia Fabaceae) son importantes fuentes de proteínas, fósforo y calcio, por lo que son fundamentales en la dieta de miles de personas, especialmente en la de los países en desarrollo (Desire et al., 2021). Las leguminosas incluyen plantas pequeñas (al-

falfa, guisantes, soja y tréboles), arbustos (pigweed pigeon pea) y árboles, con frutos leguminosos y láminas foliares (Fontaneli et al., 2009). Además, la mayoría de las leguminosas son capaces de establecer una asociación mutualista con rizobios que les proporcionan fotoasimilados y nutrientes y reciben N en forma de amonio y aminoácidos (Liu et al., 2018); por lo tanto, esta fijación biológica de nitrógeno (FBN) es una alternativa al uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes del proceso de producción de fertilizantes, su transporte y su aplicación en los cultivos en el campo (Sant'Anna et al., 2018). Las leguminosas son ampliamente utilizadas como abono verde en cultivos con mayor demanda de este nutriente por su capacidad de obtener N fijado biológicamente (Zotarelli et al., 2012). Debido a los citados beneficios de estos cultivos, se han conducido numerosos estudios para evaluar sus rendimientos, incluso mediante la aplicación foliar de SA.

Las judías (*Phaseolus vulgaris* L.) pertenecen a esta familia y tienen altos niveles de proteínas, fibra, carbohidratos complejos, ácido fólico, hierro, zinc, magnesio y potasio (Ribeiro et al., 2011). Elkhatib et al. (2020) evaluaron el rendimiento de la judía común cv. Nebraska en dos experimentos de campo en Egipto, después de la fertilización foliar con HA (1 y 2 g. L⁻¹), FA (2,5 y 5 g. L⁻¹), y triptófano, un precursor fisiológico del ácido indolacético (0,5 y 1 g. L⁻¹), y todos ellos fueron rociados dos veces, 24 días después de la siembra y al inicio de la floración. Se observó que todos los bioestimulantes aumentaron la altura de la planta, la masa fresca y seca del follaje, el número de hojas/planta, el área foliar, el % de N, el % de P, el % de K, el contenido de clorofila de la hoja, el número de vainas/planta, la vaina/planta, el peso de la semilla/planta y el rendimiento de la semilla. El triptófano proporcionó los resultados más elevados, seguido del AF y el HA.

Trabajando con la aplicación foliar de AF (0, 3, 6 y 9 g. L⁻¹) en la especie de haba *Vicia faba* L. a los 45 y 60 días después de la siembra (fase de elongación), Abdel-Baky et al. (2019) también observaron mejoras en los parámetros de cultivo mencionados, con

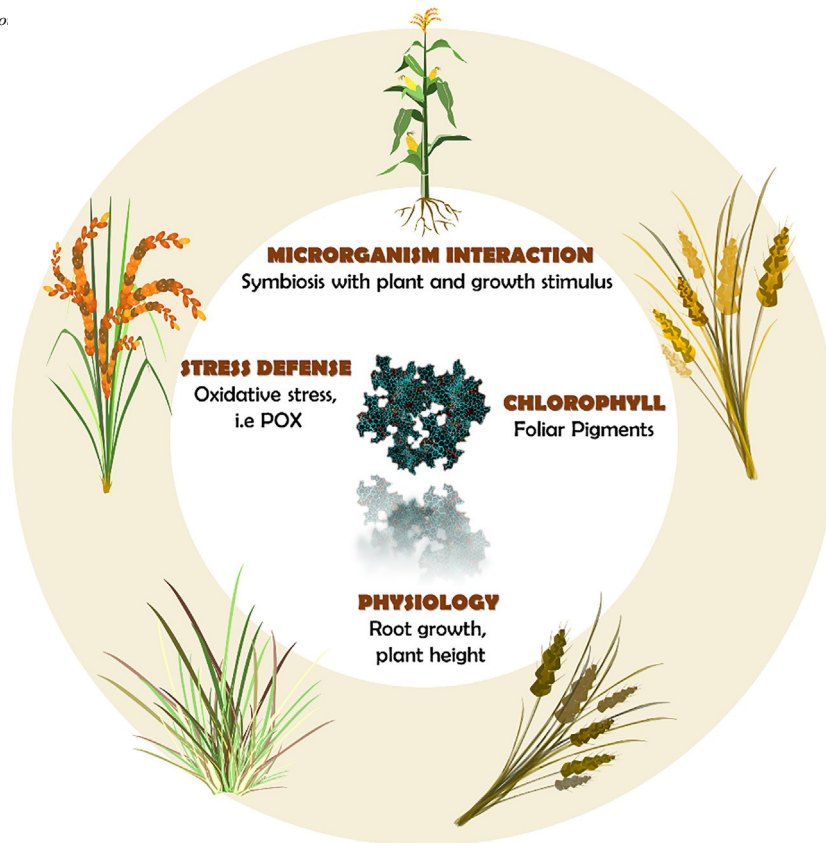


Fig. 5. Efectos principales de la aplicación foliar de HS en gramíneas.

las respuestas más altas se obtuvieron con la dosis más alta de AF (9 g. L^{-1}). En Kaya et al. (2005), se probaron los efectos de la aplicación foliar de un producto a base de SA (a una dosis de 2000 mL. ha^{-1}), el pretratamiento de las semillas con zinc y una combinación de los dos tratamientos en judía común. La pulverización foliar se realizó en el estadio de tercera a sexta hoja por la noche, ya que durante el día las altas temperaturas hacían que las plantas transpiraran más en lugar de absorber nutrientes. Los dos métodos de aplicación por separado no produjeron efectos significativos, pero juntos contribuyeron a aumentar parámetros como la altura de la planta, el número de vainas/planta y el número de semillas/planta, además del peso de las semillas/planta, lo que indica un efecto sinérgico entre los tratamientos.

Muchos otros cultivos de leguminosas de interés económico ya han recibido aplicaciones foliares de HS. Por ejemplo, la soja (*Glycine max* L. Merr.) se roció con un producto húmico comercial derivado de la leonardita en cuatro fases de su desarrollo (vegetativa: V2, V4 y V6; reproductiva: R2, plena floración). Se realizaron experimentos con pruebas de campo en tres lugares diferentes del estado de Iowa (EE.UU.). La altura de las plantas y el contenido de aceite de las semillas no se alteraron en ningún experimento. La densidad del rodal, el contenido de proteínas de las semillas y el rendimiento de los cultivos solo aumentaron en algunos lugares evaluados (Lenssen et al., 2019). Para el cultivo de guisantes (*Pisum sativum* L.) en condiciones crecientes de estrés salino, Basha et al. (2020) probaron la fertilización del suelo con sulfato potásico con y sin aplicación foliar de HA (0,2%) aplicada tres veces (1, 3 y 5 semanas después del trasplante). Los autores encontraron mejoras en parámetros de crecimiento y desarrollo como altura de planta, área foliar y número de vainas/plantas, además de una reducción en los efectos deletéreos de la salinidad sobre los niveles de clorofila a, b y carotenoides. En relación con el cacahuate (*Arachis hypogaea* L.), también hay estudios que indican un aumento de los rendimientos y de sus componentes en respuesta a la pulverización foliar de productos a base de AH, solos o en alguna combinación de éstos; una aplicación del mismo producto al suelo (con tratamiento foliar a razón de 1, 1,5, y 2% a los 45 días después de la siembra) o basado en Teli et al. (2020) junto con fosfato diamonio (DAP-2,0%) y una mezcla de micronutrientes (0,35%), con tratamiento foliar de 0,3% HA pulverizado dos veces (Reddy et al., 2020). Meena et al. (2018) investigaron la influencia de una pulverización foliar del 15% de HA líquido (dosis de 1,0, 1,5, 2,5 y 4,0 mL. L^{-1}) a 30, 60 y 90 días después de la siembra del guandú (*Cajanus cajan* (L) Millsp.), un

arbusto leguminoso. Se observaron incrementos en índices como área foliar, tasa de crecimiento relativo, tasa de asimilación neta y materia seca total, y los resultados aumentaron con la dosis de HA. En otro estudio con la misma especie, la aplicación foliar de AH (1 mL. L^{-1}) se produjo una vez (30 días después de la siembra) o dos veces (a los 30 y 45 días después de la siembra), además de otros tratamientos con aplicaciones al suelo de AH y compost. En general, las mejores respuestas se obtuvieron de la fertilización al suelo; sin embargo, en comparación con el control, los aportes foliares de HA (especialmente aplicados dos veces) también proporcionaron incrementos en parámetros como biomasa seca, número de vainas/planta y rendimiento de semilla (Nalia y Sengupta, 2019). Por su parte, Susithra et al. (2019) probaron la pulverización foliar de HA (0,25%) combinada con una dosis recomendada de fertilizante más fosfobacterias aplicada al suelo (2 kg. ha^{-1}). Los autores también observaron incrementos significativos en los parámetros de crecimiento antes mencionados (Fig. 6).

4.2.2. Aplicación foliar de SA a frutales

La producción de fruta es un segmento importante de la

producción agrícola mundial. La clasificación mundial de los países que más fruta producen tiene a China en primer lugar, seguida de India y Brasil. Por ejemplo, China aporta el 60% de la producción total de fruta fresca, principalmente manzanas, melocotones, peras, plátanos y naranjas (FAOSTAT, 2013). En Brasil, la mayoría de estos cultivos frutales son permanentes, mientras que las principales plantas frutales temporales del país son la piña, el melón y la sandía (Gerum et al., 2019).

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Barbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al.

De la misma forma ya descrita para los demás grupos vegetales, las plantas frutales también son objeto de estudios que evalúan la bioactividad de materiales humificados, incluyendo la fertilización foliar de AH. Cavalcante et al. (2011) pulverizaron directamente HA derivado de leonardita en dosis de 0, 7,5, 15, 22,5 y 30 mL. m² a los 15, 25 y 30 días después de la siembra de papaya (*Carica papaya* L.) en un refugio cubierto. El mismo grupo de investigación, en un estudio posterior, evaluó la aplicación foliar del mismo producto al maracuyá amarillo (*Pas- siflora edulis* Sims.) (Cavalcante et al., 2013). Para ambos cultivos, hubo aumentos en la altura de la planta, el diámetro del tallo, la masa seca de raíces y brotes, y los niveles de clorofila en las hojas. Este mismo equipo (Silva- Matos et al., 2012) ensayó la aplicación foliar del mismo producto y a las mismas dosis en sandía (*Citrullus lanatus* L.) con diferentes periodos de fertilización (a los 10, 15 y 20 días después de la siembra). Los análisis de las variables se realizaron 25 días después de la siembra, y los incrementos observados en los parámetros fueron los mismos que los indicados en los dos estudios anteriores, además de incrementos en la longitud y el volumen de las raíces. En general, la dosis más sensible fue 22,5 mL. m², observándose una reducción de los efectos beneficiosos con la dosis más alta.

Ferrara y Brunetti (2010), trabajando con una especie de uva de mesa (*Vitis vinifera* L. cv. "Itália"), realizaron una aplicación foliar de AH procedentes de compost y suelo, a concentraciones de 5 y 20 mg. L⁻¹. Encontraron que ambas fuentes de AHs resultaron en un aumento en el rendimiento del cultivo, tamaño de las bayas, contenido de clorofila, N en hojas y peciolas, y % de SST y una reducción de la acidez titulable de los frutos y un retraso en la degradación de la clorofila. En un artículo posterior, estos mismos autores ensayaron la aplicación de un AH extraído de una muestra de suelo arcilloso (dosis de 100 mg. L⁻¹) sobre el mismo cultivar en cuatro momentos diferentes, prefloración, plena floración, fructificación y "envero". Encontraron las mismas respuestas que en el estudio anterior y concluyeron que el tratamiento en la etapa fenológica de plena floración mostró las mayores diferencias en comparación con las del control (Ferrara y Brunetti 2010). También existen informes sobre la pulverización de vermicompost HA (30, 40 y 50 mg. L⁻¹) sobre el follaje en las fases de prefloración y fructificación de dos cultivares de uva de vinificación (*Vitis vinifera* cv. Feteasca Regala; *Vitis vinifera* cv. Riesling Italian) en un experimento de campo de dos años en Rumanía. Se observaron mayores rendimientos (kg. vid⁻¹), tasas fotosintéticas, contenidos de clorofila a y b y carotenoides, área foliar, masa seca y fresca de hojas, masa y volumen de bayas, y % SST y menor acidez titulable. En las condiciones de estos experimentos, la dosis intermedia de 40 mg. L⁻¹ fue la más sensible (Popescu y Popescu 2018).

Se observaron mayores rendimientos (kg. árbol⁻¹) tras la aplicación foliar

(entre otros productos) de una solución de HA a dosis similares en los siguientes cultivos: mango (*Mangifera indica* L.) a dosis de 0,1, 0,2 y 0,3% pulverizadas en la fase de iniciación del botón floral (Ngullie et al., 2014) y al 0,15, 0,3 y 0,45% aplicados tres veces, dos antes y una durante la floración (El-Hoseiny et al., 2020); melocotón (*P. persica* L.) al 0,25 y 0,5%, respectivamente, después de la fructificación, repetido 4 veces con un intervalo de 15 días (El-Razek et al., 2012); manzana de azúcar (*Annona squamosa* L.), al 1 y 1,5% (Sindha et al., 2018); anacardo (*Anacardium occidentale* L. al 0,5%, repetido tres veces en las etapas anterior y posterior al brote vegetativo y durante la fructificación (Dhanasekaran et al., 2018); kiwi (*A. Chev.*) CF Liang y AR Ferguson.) al 0,1 y 0,2%, rociado tres veces, antes de la antesis, después de la fructificación y en la etapa de desarrollo del fruto (Mahmoudi et al., 2014).

El cultivo de granado (*Punica granatum* L.) con fertilización foliar HA (2 y 5 mg. L⁻¹), además de los productos Caolín (6%) y 3% calcio-1% boro (CB), todos ellos aplicados solos o

conjuntamente, a los 30 días de la plena floración, tuvo el efecto beneficioso de reducir el porcentaje de frutos rajados y aumentar el peso de los frutos (Ghanbarpour et al., 2019). Para este mismo cultivo, Sándor et al. (2015) observaron aumentos en el diámetro del tallo, la altura de la planta,

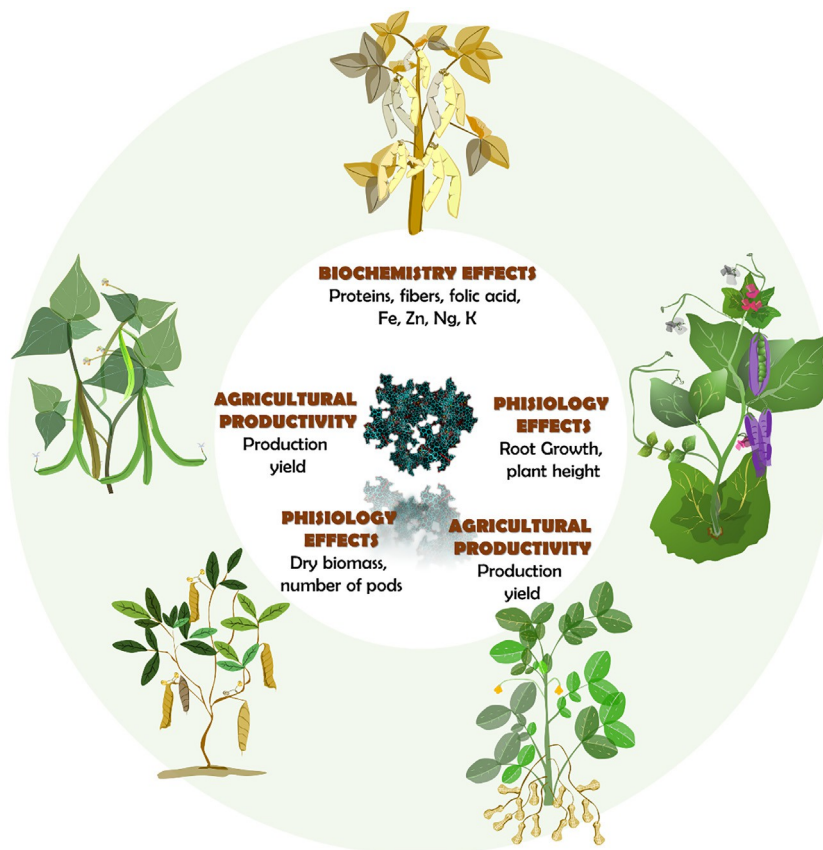


Fig. 6. Efectos principales de la aplicación foliar de HS en leguminosas.

peso de la planta y número de raíces de plántulas de granado tratadas con AF foliar (10 L. ha^{-1} , 120 días después de plantar los esquejes en viveros), además de AH en el suelo (100 kg. ha^{-1} , dividido en dos). También se observaron ventajas de la SA durante el cultivo de guayaba (*Psidium guajava* L.), donde la pulverización de humato potásico ($0, 2$ y 4 mg. L^{-1}) cuatro veces, una vez por semana, produjo aumentos en los diversos parámetros evaluados (altura, diámetro del tallo, número de brotes laterales y número de hojas/semilleros), además de una reducción del contenido de agua de las hojas, siendo el tratamiento de 4 mg. L^{-1} fue el más sensible (Abdulhameed Ibrahim y Abdulali Al-Sereh 2019).

También se compararon aplicaciones foliares y al suelo de HA en cultivos de pistacho (*Pistacia vera* L.) (40 L. ha^{-1} al suelo; $2,5 \text{ L. ha}^{-1}$ a las hojas 3 meses después de la plantación (Razavi Nasab et al., 2019) y cultivos de apri-cot (*Prunus armeniaca* L.) (producto actosol, 2,9% HA: $0, 9$ y 15 cm^3 en las hojas; $0, 37,5$, y 75 cm^3 en el suelo) (Fathy et al., 2010). Ambos estudios reportaron incrementos en los parámetros de crecimiento de las respectivas especies; sin embargo, para pistacho, la aplicación foliar fue más efectiva, mientras que para albaricoque, el mejor tratamiento fue el al suelo. Baldotto et al. (2011), trabajando con piña (*Ananas comosus* (L.) Merrill), pulverizaron vermicompost HA ($0, 10, 20$ y 40 mmol. L^{-1}) más fosfato de roca, con o sin adición de ácido cítrico, a las axilas basales de las hojas. Se observaron incrementos en la altura de la planta, la longitud de la planta y la anchura del tercio medio de la hoja "D", el diámetro de la roseta y la base, el área y el número de hojas y el contenido de nutrientes en los brotes (Fig. 7).

4.2.3. Aplicación foliar de HS a semillas oleaginosas y plantas medicinales

Las especies que tienen la capacidad de acumular aceites en sus semillas, especialmente triacilgliceroles, se conocen como cultivos

oleaginosos. Esta reserva de almacenamiento se utiliza posteriormente para el desarrollo de plántulas. Este tipo de plantas son fundamentales para la industria agrícola y resultan útiles en la alimentación

O. Vioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbara, D. França de Oliveira Torchia et al. procesamiento y preparación y la producción de biodiésel y como materia prima para la síntesis de diversos productos (lubricantes, pinturas, revestimientos, etc.). Los principales cultivos de este grupo son la soja (al- lista en la sección de leguminosas), el girasol, la colza y el aceite de palma (Zafar et al., 2019). A su vez, las plantas medicinales desempeñan un papel importante en la curación de diversas enfermedades humanas porque contienen moléculas bioactivas como alcaloides simples, antraquinonas, glucósidos de naf- topirona, compuestos fenólicos, esteroides y terpenos. Tales sustancias bioactivas pueden ser sintetizadas tanto por las plantas como por un consorcio microbiano en sus tejidos, y estos microbios, que residen en las plantas de forma asintomática, se conocen como endófitos (Yadav y Meena 2021). Esta categoría incluye, entre otras, las siguientes especies: alcachofa, romero, chamo- milla, hinojo, eucalipto y jengibre (Argenta et al., 2011).

Thakur et al. (2017) evaluaron la pulverización foliar de HA (fase de brote) y FA + NPK (fase floral) en girasol (*Helianthus annuus* L.), con ambos productos pulverizados a dosis del 0,5 y 1,0%. Además del tratamiento foliar, también se aplicó al suelo HA granulado ($12,5 \text{ kg. ha}^{-1}$) + NPK. Se produjo un aumento de los contenidos de N, P y K en las semillas, los tallos y el suelo después de la cosecha, así como en las poblaciones microbianas del suelo. El HA aplicado al suelo generó los resultados más altos; sin embargo, fue seguido de cerca por los tratamientos foliares. Shindhe et al. (2020) ensayaron aplicaciones de AH (4 ppm) y otros productos orgánicos (vermicompost y extractos de estiércol de corral, entre otros) al follaje, comparándolos con la pulverización inorgánica (0,1% de boro), con agua sola y con el control (sin pulverización). Los tratamientos se realizaron a los 40 y 60 días después de la siembra. Se observaron incrementos en la altura de la planta, número de hojas, área foliar, masa seca foliar, masa seca del tallo, diámetro de la cabeza, % de aquenios llenos, índice de har- vest, peso hectolítrico ($\text{g}/100 \text{ semillas}$), y rendimientos de semilla (g. planta^{-1}) y total (kg. ha^{-1}). Para todos estos parámetros, HA superó al control y a la aplicación con agua. Sin embargo, el tratamiento húmico

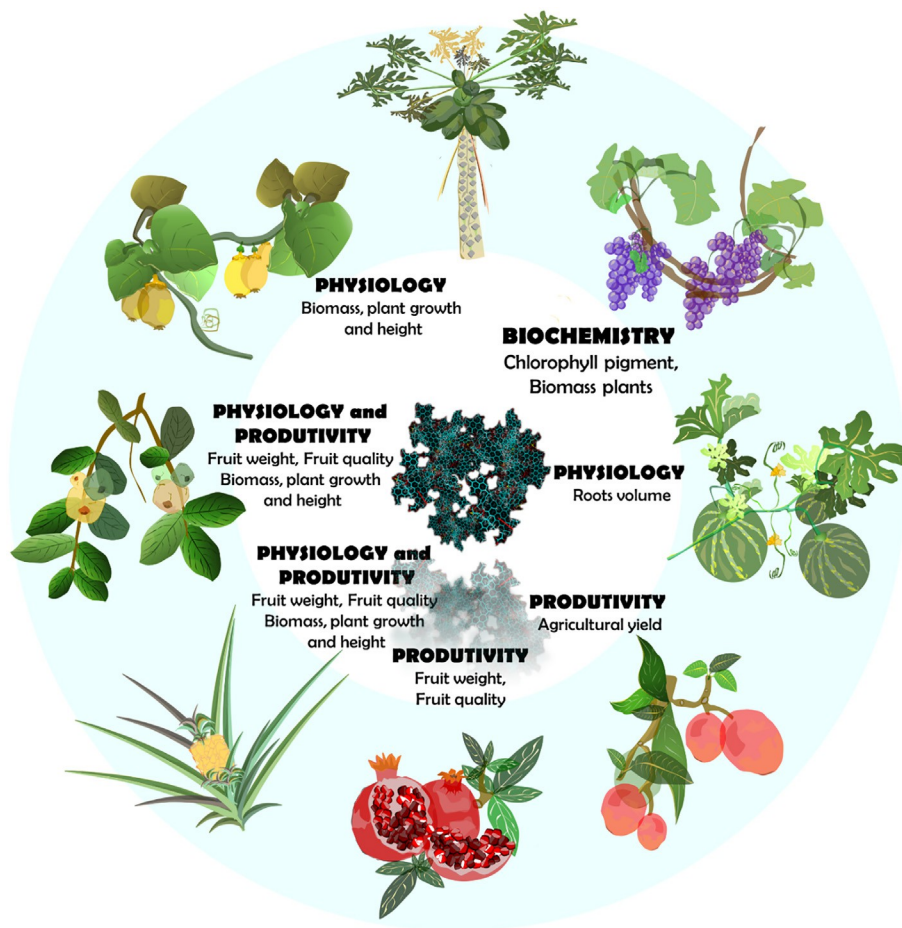


Fig. 7. Efectos principales de la aplicación foliar de HS en frutales.

Sólo fue superior al boro en cuanto a los parámetros morfológicos y de crecimiento y fue superado por la mayoría de los demás productos orgánicos en todos los rasgos evaluados.

Evaluando la influencia de los SA en la colza (*Brassica napus* L.), Lotfi et al. (2015) aplicaron una solución de FA (0, 300 y 600 mg. L⁻¹) a las hojas en las etapas de crecimiento vegetativo y floración inicial en parcelas bien regadas con estrés hídrico de moderado a severo. Los autores reportaron que el AF generó un incremento en las actividades de enzimas antioxidantes (SOD, POD, APX, y CAT), una reducción en los niveles de MDA y de peroxidación lipídica de las membranas, y una mejora en el aparato fotosintético, con mayor eficiencia cuántica que el fotosistema dos (PSII). Por su parte, Amiri et al. (2020), estudiando esta misma especie, ensayaron la pulverización foliar del producto Humax 95 - WSG (80% HA y 15% AF) al 0,3% en dos estadios, el de 4-6 hojas y el de formación de yemas. Se observó un mayor rendimiento de semillas y aceite, un aumento de los contenidos de ácido oleico y linoleico, y una reducción de los contenidos de ácido linolénico, ácido erúxico y glucosinolatos. En un cultivo de lino (*Linum usitatissimum* L.), Bakry et al. (2013) aplicaron HA (0 y 15 mg. L⁻¹) vía foliar a los 45 y 60 días después de la siembra, además de fertilización orgánica al suelo. Se observaron incrementos en parámetros como altura de planta, masa fresca y seca de raíz y brote, longitud de raíz, %TSS, contenido en polisacáridos, IAA, fenoles totales, y rendimiento biológico, de semilla, aceite y %. En cuanto al cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), la fertilización foliar con HSs proporcionó incrementos en los contenidos foliares de nutrientes (Fernández-Escobar et al., 1996), clorofila, carbohidratos, proteínas, fibra y grasa (Alshamlat et al., 2020).

En el caso de las especies medicinales, también hay muchos estudios sobre la efi

de la aplicación foliar de HS. En el sésamo (*Sesamum indicum* L.), aumenta los parámetros de crecimiento y la producción de semillas (Vani et al.,

O. Vioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbara, D. França de Oliveira Torchia et al. (2017) y se observaron contenidos foliares de N, P, K y clorofila y % de aceite de semilla (Deotale et al., 2019). Safaei et al. (2014) probaron la fertilización en las hojas de comino negro (*Nigella sativa* L.) con el producto superhúmico (37% HA + FA, dosis de 0, 1, 3 y 6 mg. L⁻¹), aplicado tres veces, comenzando en la etapa con 8-10 hojas y continuando una vez cada dos semanas, hasta después de la floración. Los autores identificaron un mayor número de cápsulas/planta, número de semillas/cápsulas, peso de las semillas/planta, rendimiento de semillas y biológico, e índice de cosecha. En general, las dosis más altas (3 y 6 mg. L⁻¹) generaron los mejores resultados. La menta piperita (*Mentha × piperita* L.) recibió una aplicación HS al suelo y a los brotes, y en este último caso, una dosis de 1,5 mg. L⁻¹ del producto (12% HA y 4% PA), cuatro veces a intervalos de 15 días, a partir de quince días después del trasplante. Estos dos métodos de fertilización húmica se combinaron con la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la adición de fertilizante químico. Los tratamientos con HS aumentaron los parámetros de crecimiento y desarrollo, además de los niveles de SST, fenólicos solubles, clorofila a y b, carotenoides, almidón y proteína soluble total, así como el poder antioxidante. También se observó una reducción en la colonización de las raíces por AMF tras los tratamientos húmicos. En general, la aplicación foliar de HS fue más eficaz que la aplicación al suelo y, junto con la inoculación de AMF, fue más beneficiosa que la fertilización química (Shahabivand et al., 2018). También se reportaron incrementos en rasgos relacionados con el crecimiento y rendimiento de capítulos florales y aceite de manzanilla (*Matri- caria chamomilla* L.) tras la aplicación foliar de AH (0, 50, 100 y 150 mg. L⁻¹) a los 30 y 60 días después del trasplante (Hassan y Fahmy 2020).

Otras especies de plantas medicinales también se han beneficiado de los tratamientos foliares. fertilización con HS; por ejemplo, la cúrcuma (*Curcuma longa* L.) recibió 0,1% de humato potásico (31,8% de HA) a los 90 y 120 días

después de la siembra y aumentó su absorción de azufre (S) (Baskar y Sankaran 2004); hinojo (*Foeniculum vulgare* Mill.), que también recibió humato potásico (0, 2, 3, 4 y 5 cm/L) 6 y 8 semanas después de la siembra, aumentó sus parámetros de crecimiento vegetativo y la composición química de sus hojas (El-Sawy et al., 2021); stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni), recibió pulverización de FA leonardita (500 mg. L⁻¹) una vez cada dos semanas tras el trasplante, donde además de los efectos positivos sobre el crecimiento, se observó un mayor % de glicósidos de esteviol (especies edulcorantes) y una reducción de la diversidad de la comunidad bacteriana endofítica, con una mayor presencia de bacterias beneficiosas y un menor número de patógenos potenciales (Yu et al., 2015); vinagre/rosella (*Hibiscus sabdariffa* L.) recibió una aplicación foliar de humato potásico 80% HA (0, 1, 2 y 3 g. L⁻¹) a los 60, 75 y 90 días después de la siembra (Amin y Kanimarani 2020) y la pulverización del producto Helpstar (12% HA) a 2 cm. L⁻¹ dos veces con un intervalo mensual (Ahmed et al., 2011). En ambos estudios se observaron mejoras en los parámetros de crecimiento vegetativo (Fig. 8).

4.2.4. Aplicación foliar de HS a plantas ornamentales

Las plantas ornamentales son reconocidas por sus flores, formas, colores de las hojas y otros aspectos atractivos, contribuyendo así al embellecimiento de los ambientes (Pereira et al., 2018). La floricultura es la producción de flores con fines de comercialización, que, a pesar de ser considerada por muchos como una actividad superflua,

cumple funciones económicas y sociales, ya que genera puestos de trabajo y proporciona funciones culturales y ecológicas (Terra y Oliveira 2013).

En uno de los estudios más antiguos sobre fertilización foliar con SA, Sladky (1959) probó la aplicación de SA a plantas de begonia (*Begonia semperflorens* Link y Otto) con tres fracciones húmicas: extracto alcohólico, HA y FA (todas a 100 mg/L). El autor de ese estudio descubrió que FA era el componente húmico que generaba los mejores resultados, aumentando la altura de la planta, la masa seca y fresca de raíces y brotes, la tasa de consumo de oxígeno y el contenido de clorofila de las hojas. Cultivando crisantemo (*Chrysanthemum indicum* L.), Mazhar et al. (2012) evaluaron la aplicación foliar de humato de potasio (0, 1, 1,5 y 2,0%) dos veces en condiciones de creciente estrés salino. El tratamiento húmico aumentó la tolerancia de la planta al estrés salino, redujo los daños y aumentó la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de ramas/plantas, la raíz y el brote seco y fresco, el número de flores/plantas, la longitud del pedicelo, la masa seca y fresca de la flor, y el % de carbohidratos, proteínas, N y K. El % de prolina y sodio (Na) disminuyó, y la dosis más alta de humato de potasio (2%) generó las mejores respuestas de todos los rasgos evaluados bajo cualquier nivel de salinidad. Fan et al. (2014) realizaron experimentos en los que rociaron HA derivado de sedimentos de residuos vegetales (1:600 (v/v)) en un invernadero sobre otra especie de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* R.), que recibió tratamientos a los 15, 30, 45 y 60 días después del trasplante. Además de los aumentos de los parámetros morfológicos mencionados en el estudio anterior, los autores de este

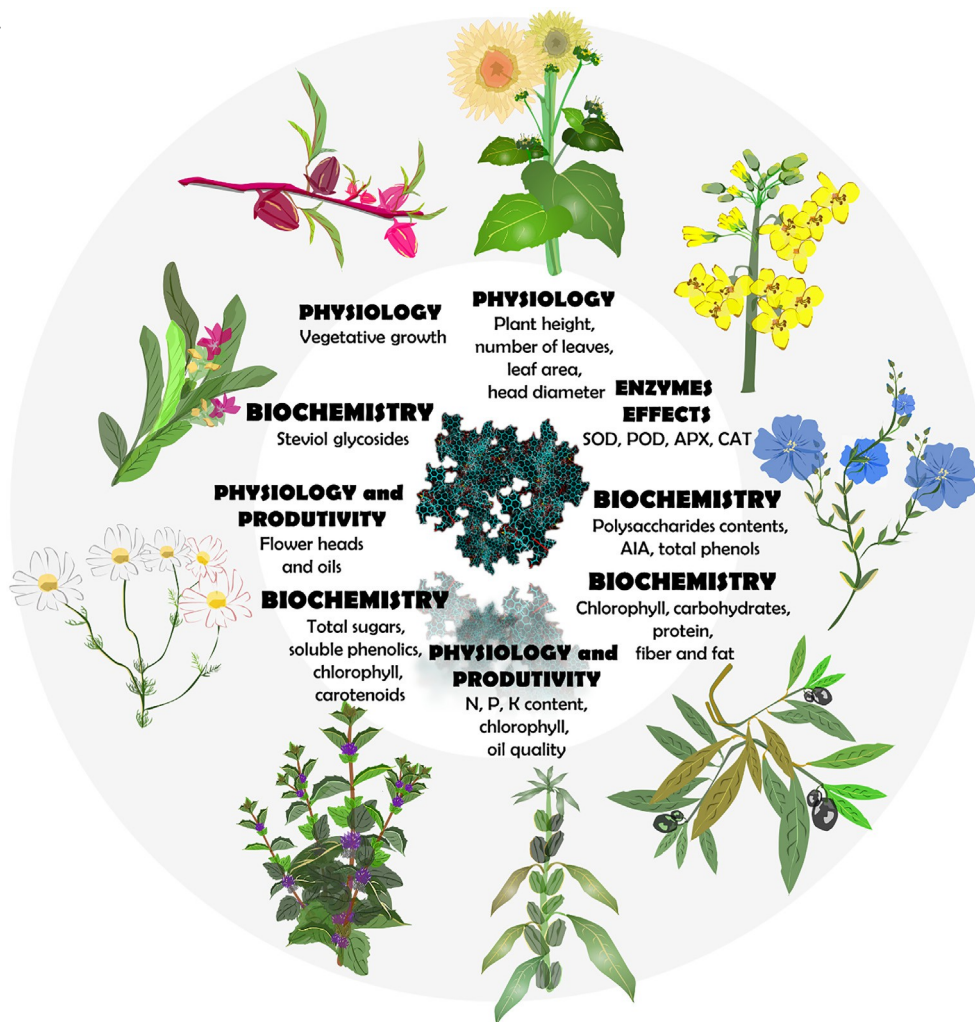


Fig. 8. Efectos principales de la aplicación foliar de HS en semillas oleaginosas y plantas medicinales.

informó de aumentos en el aparato fotosintético de las plantas con la aplicación de HA, como muestran los incrementos en las tasas de fotosíntesis neta, fluorescencia de clorofila y ultraestructura de los cloroplastos.

En el caso de las caléndulas (*Calendula officinalis* L.), la aplicación foliar de HA produjo mejoras en los rasgos morfológicos, aumentando la longitud de las hojas, el número de flores/planta y la anchura y longitud de las flores (Ahmad et al., 2019), el número de hojas/planta, el número de ramas principales y laterales/planta, la propagación de la planta (cm), el contenido de clorofila en las hojas, la masa seca y fresca de raíces y brotes, la longitud de la raíz, el número de días de inflorescencia, el número de inflorescencias/planta, la longitud del tallo, el diámetro, el número de flores y la masa seca y fresca de la inflorescencia, y la vida en jarrón (Hasan 2019). Para la mari- dor africana (*Tagetes erecta* L.), se observaron estos mismos efectos con la pulverización de HA y sulfato de zinc (ambos al 0,2%, a los 30 y 45 días después de la plantación) combinada con el suministro de la dosis recomendada de NPK mediante fertirrigación (Das et al., 2020).

Najarian, Souri y Nabigol (2022) reportaron que la aplicación de HA, principalmente a una dosis de 250 mg L⁻¹, benefició el desarrollo de *Pelargonium × hortorum*, incrementando el crecimiento vegetativo y las características de floración, tales como el número de hojas, brotes y floración y flores por planta. Otros parámetros como la longitud y los diámetros del botón floral, y la concentración de elementos minerales foliares también se vieron beneficiados. Por su parte, Boogar et al.

(2014), trabajando con petunia (*Petunia hybrida* L.) observaron que la pulverización de HA (0, 100, 300, 600 y 900 ppm) durante dos etapas de desarrollo resultó en un mayor índice de área foliar, número de hijuelos y flores, contenido relativo de agua y niveles foliares de micronutrientes (Fe, Zn, Cu y Mn), además de las mejoras mencionadas en las especies anteriores. Jawad y Majeed (2017) encontraron incrementos en los parámetros morfológicos y la vida en jarrón de la gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) tras la aplicación foliar de HA (0, 5, 7,5 y 10 mg. L⁻¹) solo o con cloruro cálcico a diferentes concentra- ciones. En general, la dosis más alta de AH (10 mg. L⁻¹) junto con las cantidades más altas de cloruro cálcico dieron los mejores resultados. En un cultivo de gladiolo (*Gladiolus grandiflorus* L.), se estudiaron los efectos del AH extraído de leonardita aplicado al suelo en el momento de la plantación o directamente al follaje en las fases de 3 y 6 hojas añadidas al suelo.

Esta triple combinación dio lugar a respuestas tales como un elevado número de hojas/planta, área foliar, contenidos de clorofila, longitud de tallo y espiga y vida en maceta, además de una menor emergencia de brotes (Fig. 9).

5. Conclusiones

El tratamiento foliar con HSs tiene el potencial de generar respuestas positivas en los más diversos cultivos de plantas agrícolas, ornamentales y

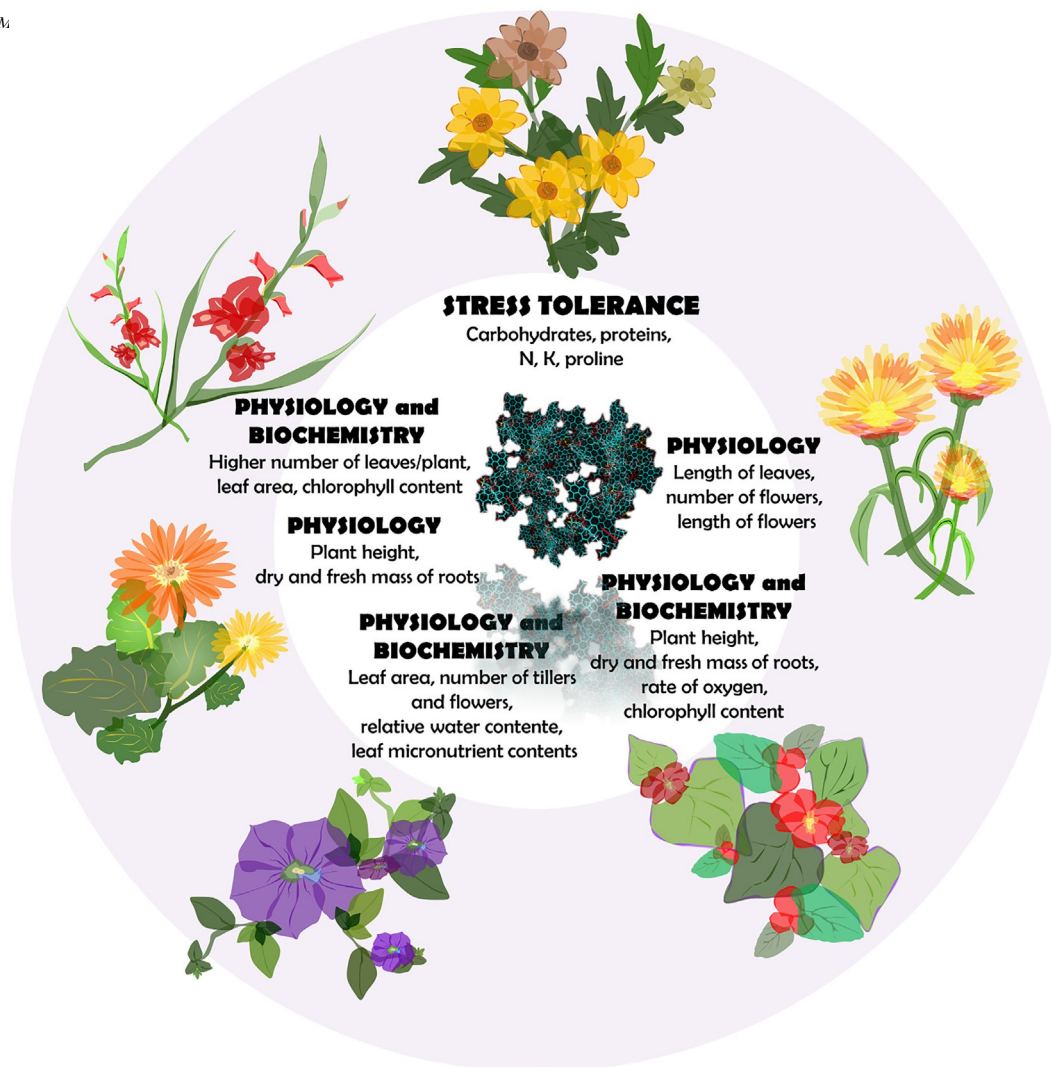


Fig. 9. Efectos principales de la aplicación foliar de HS en plantas ornamentales.

interés medicinal, mejorando los parámetros de crecimiento y desarrollo, así como las características fisiológicas y las respuestas al estrés. Sin embargo, debido a la gran complejidad estructural de los HS y al hecho de que se derivan de fuentes variadas, sus efectos difieren, incluso cuando se aplican a la misma especie vegetal. Este escenario se debe al origen del material húmico aplicado, su dosis, la etapa fenológica en la que se produce la pulverización, el número de aplicaciones, las características propias de cada especie vegetal y las condiciones experimentales y ambientales de cada localización. Así, existen estudios en los que los mejores resultados se obtuvieron con las dosis altas de HS, mientras que en otros estudios, las dosis más bajas de HS fueron más efectivas. Otro punto se refiere a las diferencias entre los tratamientos al suelo y foliares, con evidencias de que estas dos formas de fertilización utilizan mecanismos distintos que dan lugar a los efectos beneficiosos observados. Aunque ambos enfoques son capaces de aumentar la producción, algunos estudios mostraron que la aplicación al suelo es más eficaz, mientras que otros estudios indicaron que la pulverización foliar era mejor, en además de los informes de una acción complementaria entre estas dos modalidades. Por lo tanto, teniendo en cuenta esta información, la aplicación foliar HS puede utilizarse como alternativa para sistemas de producción más sostenibles de la mayoría de las especies con relevancia económica. Sin embargo, las especificidades de cada situación aquí consideradas aportan información para ayudar a seleccionar adecuadamente la mejor forma de pulverización de estos materiales, buscando una mayor relación coste-beneficio de estas actividades.

Contribuciones de los autores

Todos los autores han contribuido por igual a la preparación, redacción y revisión del manuscrito ().

Declaración de intereses en conflicto

Los autores declaran que no tienen intereses económicos en competencia ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo ().

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - Brasil (Grant no.SisFAPERJ: 2012028010), el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPQ:No. 402396/2021-9 Universal 18/2021, CNPq-No. 309722/2021-7, PQ -2 Beca de investigación). Programa de Posgrado en Agronomía - Ciencia del Suelo de la Universidad Federal Rural de Río de Janeiro (PPGA -CS, UFRRRJ) y la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Subvención nº CAPES:001).

Referencias

- AbdAllah, A.M., Burkey, K.O., Mashaheet, A.M., 2018. Reducción del consumo de agua de la planta mediante la aplicación foliar de antitranspirantes en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Sci. Hortic.* 235, 373-381. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.005>.
- Abdel-Baky, Y.R., Abouziena, H.F., Amin, A.A., Rashad El-Sh, M., Abd El-Sttar, A.M., 2019. Mejorar la calidad y la productividad de algunos cultivares de haba con la aplicación foliar de ácido fúlvico. *Bull. Georgian Acad. Sci. Natl. Res. Cent.* 43 (1). <https://doi.org/10.1186/s42269-018-0040-3>.
- Abdel-Razzak, H.S., El-Sharkawy, G.A., 2013. Efectos de la aplicación de biofertilizantes y ácido húmico en el crecimiento, rendimiento, calidad y almacenamiento de dos cultivares de ajo (*Allium sativum* L.). *Asian. J. Crop. Sci.* 5 (1), 48-64. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.48.64>.
- Abdulbaset, I., Al-Madhagi, H., 2019. Efecto del ácido húmico y la levadura en el

- rendimiento del pepino de invernadero. *J. hort. Postharvest Res.* 2 (1), 67-82. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2018.1773.1029>.
- Abdulhameed Ibrahim, M., Abdulali Al-Sereh, E., 2019. Effect of foliar spray with potassium humate and green tea extract on some of the vegetative characteristics of guava (*Psidium guajava* L. Cv. Local) seedlings. *Plant Arch.* 19 (1), 404-408.

- Q. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro, Barbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al. Abdussattar, W., Fandawi, E., 2020. Efecto del ácido húmico en el crecimiento y rendimiento de la cebada ácido húmico como interactuó con el espaciamiento entre hileras proyecto. *Indian J. Ecol* 47, 62-65.
- Abido, W.A.E., Ibrahim, M.E.M., 2017. Papel de la pulverización foliar con sustancias bioestimulantes en la disminución del fertilizante nitrogenado mineral de la remolacha azucarera. *J. Plant Production Mansoura Univ.* 8, 1335-1343. <https://doi.org/10.21608/jpp.2017.41994>.
- Ahmad, S., Khan, J.A., Jamal, A., 2019. Respuesta de la caléndula de maceta a diferentes niveles aplicados de ácido húmico. *J. Horticulture Plant Res.* 5, 57-60. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/jhpr.5.57>.
- Ahmad, I., Saquib, R.U., Qasim, M., Saleem, M., Khan, A.S., Yaseen, M., 2013. Efectos del ácido húmico y del cultivar sobre el crecimiento, rendimiento, vida en florero y características del cormo de gladiolo. *Chil. J. Agric. Res.* 73 (4), 339-344. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392013000400002>.
- Ahmed, Y.M., Shalaby, E.A., Shanan, N.T., 2011. El uso de cultivos orgánicos e inorgánicos en la mejora del crecimiento vegetativo, los caracteres de rendimiento y la actividad antioxidante de las plantas de rosa mosqueta (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Afr. J. Biotechnol.* 10 (11), 1988-1996. <https://doi.org/10.5897/AJB10.876>.
- Akladios, S.A., Mohamed, H.I., 2018. Efectos mejoradores del nitrato de calcio y el ácido húmico en el crecimiento, el componente de rendimiento y el atributo bioquímico de las plantas de pimiento (*Capsicum annuum*) cultivadas bajo estrés salino. *Sci. Hort.* 236, 244-250. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.047>.
- Alabdulla, S.A., 2019. Efecto de la aplicación foliar de ácido húmico sobre el rendimiento de forraje y grano de avena (*Avena sativa* L.). *Crop. Res.* 20 (4), 880-885. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2019.130>.
- Albuzio, A., Nardi, S., Gulli, A., 1989. Plant growth regulator activity of small molecular size humic fractions. *Sci. Total Environ.* 81 (82), 671-674. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90176-9](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90176-9).
- Alfonso, E.T., Padrón, J.R., Díaz de Armas, M.M., 2010. Respuesta del cultivo del tomate (*Solanum lycopersicon* L.) a la aplicación foliar de un bioestimulante derivado del Vermicompost. *Temas de Ciencia y Tecnología* 14 (41), 27-32.
- Alhariri, A., Boras, M., 2020. Responses of seed germination and yield related traits to seed pretreatment and foliar spray of humic and amino acids compounds in carrot (*Daucus carota* L.). *Int. J. Chem. Stud* 8 (4), 26-30. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4a.10338>.
- Ali, S., Bharwana, S.A., Rizwan, M., Farid, M., Kanwal, S., Ali, Q., Ibrahim, M., Gill, R.A., Khan, M.D., 2015. Fulvic acid mediates chromium (Cr) tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) through lowering of Cr uptake and improved antioxidant defense system. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22 (14), 10601-10609. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4271-7>.
- Al-Jaf, H.I., Raheem, S.M., Tofiq, G.K., 2018. Crecimiento y Rendimiento de Brócoli (*Brassica oleracea* L. Var. Corato) como afectado por la aplicación de ácido húmico. *J. Plant Production, Mansoura Univ.* 9, 739-741. <https://doi.org/10.21608/jpp.2018.36398>.
- Alshamlat, R.A., Makhoul Makhoul, G., Naddaf, M., Zidan, A., 2020. Efecto de la aplicación foliar de ácido húmico y el elemento, boro y zinc en los componentes de las hojas de olivo (variedad khodeiry). *Int. J. Agric. Environ. Inf.* 7 (3), 9-16.
- Amador, H.V., Guridi Izquierdo, F., Padrón, V.V., 2018. Revisión bibliográfica las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales* 39 (4), 102-109.
- Amin, M.I.M., Kanimarani, S.M.S., 2020. Impacto de la aplicación foliar de ácido húmico y el tiempo de medida en el crecimiento y la producción de Roselle *Hibiscus sabdariffa*. *J. Agric. Sci.* 20 (1), 38-48.
- Amiri Forotaghe, Z., Souri, M.K., Ghanbari Jahromi, M., Mohammadi Torkashvandi, A., 2022. Influence of humic acid application on onion growth characteristics on the water deficit conditions. *J. Plant Nutr.* 45 (7), 1030-1040.
- Amiri, M., Rad, A.H.S., Valadabadi, A., Sayfzadeh, S., Zakerin, H., 2020. Response of rapeseed fatty acid composition to foliar application of humic acid under different plant densities. *Plant Soil Environ.* 66 (6), 303-308. <https://doi.org/10.17221/220/2020-PSE>.
- Anjum, S.A., Xie, X.-Y., Wang, L.-C., Saleem, M.F., Man, C., Lei, W., 2011. Respuestas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas al estrés por sequía. *Afr. J. Agric. Res.* 6 (9), 2026-2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>.
- Argenta, S.C., Argenta, L.C., Giacomelli, S.R., Cezarotto, V.S., 2011. Plantas medicinais: cultura popular versus ciência plantas medicinais: cultura popular. *frente a la ciencia. Vivências* 7, 51-60.
- Asli, S., Neumann, P.M., 2010. Rhizosphere humic acid interacts with root cell walls to reduce hydraulic conductivity and plant development. *Plant Soil* 336 (1), 313-322. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0483-2>.
- Azarpour, E., 2012. Effects of bio, mineral nitrogen fertilizer management, under humic acid foliar spraying on fruit yield and several traits of eggplant (*Solanum melongena* L.). *African J. Agric. Res.* 7 (7). <https://doi.org/10.5897/ajar11.1833>.
- Bakry, A.B., Sadak, S.h., Moamen, H.T., Abd El Lateef, E.M., 2013. Influence of humic acid and organic fertilizer on growth, chemical constituents, yield and quality of two flax seed cultivars grown under newly reclaimed sandy soils. *Int. J. Acad. Res.* 5 (5), 125-134. <https://doi.org/10.7813/2075-4124.2013/5-5/a.17>.
- Baldotto, M.A., Giro, V.B., Baldotto, L.E.B., Canellas, L.P., Velloso, A.C.X., 2011. Rendimiento inicial de piña y utilización de fosfato de roca aplicado en combinación con compuestos orgánicos a las axilas de las hojas. *Revista Ceres* 58 (3), 393-401. <https://doi.org/10.1590/s0034-737x2011000300021>.
- Balmori, D.M., Domínguez, C.Y.A., Carreras, C.R., Rebatos, S.M., Fariás, L.B.P., Izquierdo, F.G., Berbara, R.L.L., García, A.C., 2019. La aplicación foliar de extracto líquido húmico de vermicompost mejora la producción y calidad del fruto de ajo (*Allium sativum* L.). *Int. J. Reciclaje de Residuos Orgánicos Agric.* 8, 103-112. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0279-1>.
- Basha, D.M.A., Hella, F., El-Sayed, S., 2020. Effects of potassium and humic acid on amelioration of soil salinity hazardous on pea plants. *Asian J. Soil Sci. Plant Nutr.* 1-10. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2019/v5i430073>.

- Baskar, K., Sankaran, K., 2004. Effect of lignite humic acid on available S and its uptake in turmeric. *Agropedology*. 14.
- Boldrin, P.F., Faquin, V., Ramos, S.J., Boldrin, K.V.F., Ávila, F.W., Guilherme, L.R.G., 2013. Aplicación al suelo y foliar de selenio en la biofortificación del arroz. *J. Food Compos. Anal.* 31 (2), 238-244. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.06.002>.
- Boogar, A.R., Shirmohammadi, E., Geikloo, A., 2014. Bulletin of environment, pharmacology and life sciences effect of humic acid application on qualitative characteristic and micronutrient status in *Petunia hybrid L.* *Env. Pharmacol. Life Sci.* 3, 15-19.
- Boussingault, J.B., 1868. Action deletere de la vapeur du mercure sur les plantes. *Agronomie* 4, 343-359.
- Brongniart, A., 1834. Sur l'epiderme des plantes. Nouvelles r 'echerches sur lastructure de l'epiderm des v'eg'etaux. *Ann. Sci. Nat. (Bot)* 1, 65-71.
- Burkhardt, J., Basi, S., Pariyar, S., Hunsche, M., 2012. Stomatal penetration by aqueous solutions - an update involving leaf surface particles. *New Phytol.* 196 (3), 774-787. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04307.x>.
- Bustamante Eguiguren, S., Nguyen, H.A., Caldwell, A., Nolin, K.A., Wu, C.A., 2020. Convergencia de la morfología y química de los tricomas glandulares en dos especies de monkeyflower (*Mimulus*, Phrymaceae) de montaña. *Flora: Morphology, Distribution, Funct. Ecol. Plants* 265. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151567>.
- Camargo Junior, O. A., Brandão Junior, J. U. T., Santos, H. S., Freitas, P. S. L. de. 2018. Hortaliças-fruto: aspectos gerais e uma estimativa da produção científica. En: *Hortaliças-fruto*. pp. 23-35. EDUEM.
- Canellas, L.P., Ferreira Da Silva, S., Lopes Olivares, F., 2005. La aplicación foliar de *Herbaspirillum seropedicae* y ácido húmico aumenta el rendimiento del maíz. *J. Food Agric. Environ.* 13, 146-153.
- Canellas, L.P., Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Jones, D.L., Nebbioso, A., Mazzei, P., Piccolo, A., 2015. Ácidos húmicos y fúlvicos como bioestimulantes en horticultura. *Sci. Hortic.* 196, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>.
- Cavalcante, Í.H.L., da Silva, R.R.S., Albano, F.G., de Lima, F.N., Marques, A.S., 2011. Pulverización foliar de sustancias húmicas en la producción de plántulas de papaya (pawpaw). *J. Agron.* 10 (4), 118-122. <https://doi.org/10.3923/ja.2011.118.122>.
- Cavalcante, I.H.L., Silva-Matos, R.R.S., Albano, F.G., Silva Júnior, G.B., Silva, A.M., Costa, L.S., 2013. Pulverización foliar de sustancias húmicas en la producción de plántulas de maracujá amarillo. *J. Food Agric. Environ.* 11 (2), 301-304.
- Cha, J.Y., Kang, S.H., Ali, I., Lee, S.C., Ji, M.G., Jeong, S.Y., Shin, G.I., Kim, M.G., Jeon, J.R., Kim, W.Y., 2020. Humic acid enhances heat stress tolerance via transcriptional activation of Heat-Shock Proteins in *Arabidopsis*. *Sci. Rep.* 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71701-8>.
- Chen, Y., Aviad, T., 1990. Efectos de las sustancias húmicas en el crecimiento de las plantas. En: *MacCarthy, P. (Ed.), Humic substances in soil and crop science: selected readings*. Madison, Wisconsin, pp. 161-186.
- Cooper, R.J., Liu, C., Fisher, D.S., 1998. Influence of humic substances on rooting and nutrient content of creeping bentgrass. *Crop Sci.* 38 (6), 1639-1644. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X0038000600037x>.
- Cristofano, F., El-Nakhel, C., Roupael, Y., 1 de agosto. Sustancias bioestimulantes para una agricultura sostenible: Origin, operating mechanisms and effects on cucurbits, leafy greens, and nightshade vegetables species. *Biomolecules*. <https://doi.org/10.3390/biom11081103>.
- da Silva Pereira, J., dos Santos Silva, D.L., da Silva, G.S., dos Santos Oliveira, D., 2018. Plantas ornamentais ocorrentes no município de aldeias altas, Maranhão, Brasil. *Acta Tecnológica* 13 (1), 79-93. <https://doi.org/10.35818/acta.v13i1.612>.
- Das, S., Rahman, F.H., Sengupta, T., Nag, K., 2020. Studies on the response of african marigold (*Tagetes erecta*) to npk, humic acid and zinc sulphate in red and lateritic soils of Jhargarm district of west bengal. *Adv. Res.*
- de Aguiar, T.C., de Oliveira Torchia, D.F., de Castro, T.A.V.T., Tavares, O.C.H., de Abreu Lopes, S., da Silva, L.D.S., Castro, R.N., Berbara, R.L.L., Pereira, M.G., García, A.C., 2022. El modelado espectroscópico-quimiométrico de 80 ácidos húmicos confirma la identidad del patrón estructural de la materia orgánica humificada a pesar de los diferentes ambientes de formación. *Sci. Total Environ.* 833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155133>.
- de Castro, T.A.V.T., Berbara, R.L.L., Tavares, O.C.H., da Graça Mello, D.F., Pereira, E.G., de Souza, C.D.C.B., Espinosa, L.M., García, A.C., 2021. Los ácidos húmicos inducen un estado de eustrés a través de la fotosíntesis y el metabolismo del nitrógeno que conduce a una mejora del crecimiento radicular en plantas de arroz. *Plant Physiol. Biochem.* 162, 171-184. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.043>.
- de Hita, D., Fuentes, M., Fernández, V., Zamarreño, A.M., Olaetxea, M., García-Mina, J. M., 2020. Discriminación de la acción a corto plazo de la aplicación radicular y foliar de ácidos húmicos sobre el crecimiento vegetal: papel emergente del ácido jasmónico. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00493>.
- de Souza, E.L., da Cruz, P.J.R., Bonfá, C.S., Magalhães, M.A., 2018. Plantas forrageiras para pastos de alta produtividade Bovinocultura, equideocultura, forragem, ovinocaprinocultura, produção. *Nutri Time* 15 (4), 8272-8284.
- del Amor, F.M., Cuadra-Crespo, P., 2011. Intercambio gaseoso y respuesta antioxidante del pimiento dulce a la pulverización foliar de urea en función de la temperatura ambiente. *Sci. Hortic.* 127 (3), 334-340. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.10.028>.
- Delfino, S., Tognetti, R., Desiderio, E., Alvino, A., 2005. Efecto de la aplicación foliar de N y ácidos húmicos sobre el crecimiento y rendimiento del trigo duro. *Agronomie* 25 (2), 183-191. <https://doi.org/10.1051/agro:2005017>.
- Demidchik, V., Shabala, S.N., Davies, J.M., 2007. Spatial variation in H O₂ response of *Arabidopsis thaliana* root epidermal Ca²⁺ flux and plasma membrane Ca²⁺ channels. *Plant J.* 49 (3), 377-386. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2006.02971.x>.
- Deotale, R.D., Guddhe, V.A., Kamdi, S.R., Patil, S.R., Madke, V.S., Baviskar, S.B., Meshram, M.P., 2019. Respuesta del ácido húmico a través del lavado de vermicompost y

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbará, D. Franca de Oliveira Torchia et al., 2021. Efecto de la aplicación foliar de ácido húmico sobre los parámetros químicos, bioquímicos, de rendimiento y de contribución al rendimiento del sésamo. *J. Soils Crops*.

Desire, M.F., Blessing, M., Elijah, N., Ronald, M., Agather, K., Tapiwa, Z., Florence, M. R., George, N., 1 de marzo. Exploring food fortification potential of neglected legume and oil seed crops for improving food and nutrition security among smallholder farming communities: a systematic review. *J. Agric. Food*. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100117>.

Dhanasekaran, K., Elayaraja, D., Srinivasan, S., 2018. Efecto de la aplicación foliar de ácido húmico enriquecido con micronutrientes y ácido giberélico en el rendimiento de frutos y nueces del anacardo. *JETIR* 5 (5), 771-773.

dos Santos, A.C.M., Rodrigues, L.U., de Andrade, C.A.O., da Carneiro, J.S., da Silva, R.R., 2018. Ácidos húmicos e nitrogênio na produção de mudas de alface. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada Nas Ciências Agrárias* 11 (1). <https://doi.org/10.5935/paet.v11.n1.08>.

Duan, D., Tong, J., Xu, Q., Dai, L., Ye, J., Wu, H., Xu, C., Shi, J., 2020. Regulation mechanisms of humic acid on Pb stress in tea plant (*Camellia sinensis* L.). *Environ. Pollut.* 267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115546>.

Dziugiel, T., Wadas, W., 2020. Posibilidad de aumentar el rendimiento de patatas de cultivo temprano con la aplicación foliar de extractos de algas marinas y ácidos húmicos. *J. Cent. Eur. Agric.* 21 (2), 300-310. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2576>.

El-Helaly, M.A., 2018. Efecto de la aplicación foliar de ácidos húmicos y fúlvicos sobre el rendimiento y sus componentes de algunos cultivares de zanahoria (*Daucus carota* L.). *J. Horticultural Sci. Ornamental Plants* 10 (3), 159-166. <https://doi.org/10.5829/idosi.jhsop.2018.159.166>.

El-Hoseiny, H.M., Helaly, M.N., Elsheery, N.I., Alam-Eldein, S.M., 2020. Humic acid and boron to minimize the incidence of alternate bearing and improve the productivity and fruit quality of mango trees. *HortSci.* 55 (7), 1026-1037. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15053-20>.

Elkhatib, H.A., Gabr, S.M., Roshdy, A.H., Kasi, R.S., 2020. Effects of different nitrogen fertilization rates and foliar application of humic acid, fulvic acid and tryptophan on growth, productivity and chemical composition of common bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Alexandria Sci. Exchange J.* 41 (2), 191-204. <https://doi.org/10.21608/asejaqisae.2020.93900>.

El-Sawy, S.M., El-Bassiony, A.M., Fawzy, Z.F., Shedeed, S.I., 2021. Improving yield, physical and chemical qualities of sweet fennel bulbs by spraying of potassium humate. *J. Horticultural Sci. Ornamental Plants* 13 (3), 272-281. <https://doi.org/10.5829/idosi.jhsop.2021.272.281>.

Ervin, E.H., Zhang, X., Roberts, J.C., 2008. Improving root development with foliar humic acid applications during kentucky bluegrass sod establishment on sand. *Acta Hort* 783, 317-322.

Eskandari, S., Sharifnabi, B., 2020. Foliar spray time affects the efficacy of applied manganese on enhancing cucumber resistance to *Podosphaera fuliginea*. *Sci. Hortic.* 261. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108780>.

Fageria, N.K., Filho, M.P.B., Moreira, A., Guimarães, C.M., 2009. Fertilización foliar de plantas de cultivo. *J. Plant Nutr.* 32 (6), 1044-1064. <https://doi.org/10.1080/01904160902872826>.

Fan, H.M., Wang, X.W., Sun, X., Li, Y.Y., Sun, X.Z., Zheng, C.S., 2014. Efectos del ácido húmico derivado de sedimentos sobre el crecimiento, la fotosíntesis y la ultraestructura del cloroplasto en crisantemo. *Sci. Hortic.* 177, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.010>.

FAOSTAT, 2013. Base de datos estadísticas de la organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Disponible en línea en <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.

FAO, 2022. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022. Reorientar las políticas alimentarias y agrícolas para hacer más asequibles las dietas saludables. FAO, Roma.

Fathima, P.S., Denesh, G.R., 2013. Influencia de la pulverización de ácido húmico en el crecimiento y rendimiento de chile (*Capsicum annum* L.). *International Journal of Agric. Sci.* 9 (2), 542-546.

Fathy, M.A., Gabr, M.A., el Shall, S.A., 2010. Effect of Humic Acid Treatments on "Canino" Apricot Growth, Yield and Fruit Quality. *New York Sci. J.* 3 (12), 109-115.

Faulin, E.J., Furquim De Azevedo, P., 2003. Distribuição de hortaliças na agricultura familiar: uma análise das transações. *Informações Econômicas* 22 (11), 24-37.

Felipe, L., Santoyo, R., Alcántar González, G., Ortega Escobar, M., Estrada, A.E., Soto Hernández, M., García, S., 1998. Fertilización foliar orgánica e inorgánica y rendimiento de sorgo en condiciones de salinidad. *Terra* 16 (3).

Fernández, V., Eichert, T., 2009. Absorción de solutos hidrofílicos a través de las hojas de las plantas: estado actual del conocimiento y perspectivas de la fertilización foliar. *Crit. Rev. Plant Sci.* 28 (1-2), 36-68. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>.

Fernández, V., Sotiropoulos, T., Brown, P.H., 2013. Fertilización foliar: principios científicos y prácticas de campo. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes, París, pp. 1-144.

Fernández-Escobar, R., Benlloch, M., Barranco, D., Dueñas, A., Gutiérrez Ganán, J.A., 1996. Respuesta del olivo a la aplicación foliar de sustancias húmicas extraídas de leonardita. *Sci. Hortic.* 66, 191-200.

Ferrara, G., Brunetti, G., 2010. Efectos de los tiempos de aplicación de un ácido húmico del suelo sobre la calidad de las bayas de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) cv Italia. *Span. J. Agric. Res.* 8 (3), 817-822. <https://doi.org/10.5424/1283>.

Filgueiras, T.S., 2021. Gramíneas do cerrado. IBGE, Rio de Janeiro.

Fischer, T., 2017. Humic supramolecular structures have polar surfaces and unpolar cores in native soil. *Chemosphere* 183, 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.125>.

Fontaneli, R.S., Pereira, H., Santos, D., Carlos Baier, A., 2009. Morfología de leguminosas forrageiras. En: Fontaneli, R.S., Santos, H.P.F.R.S. (Eds.), Forrageiras para Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Região Sul- Brasileira. 1 ed. Embrapa Trigo, Passo Fundo.

- Froni, T., VanderWeide, J., Palliotti, A., Tombesi, S., Poni, S., Sabbatini, P., 2021. Foliar vs. soil application of *Ascophyllum nodosum* extracts to improve grapevine water stress tolerance. *Sci. Hortic.* 277. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109807>.
- Fu, Y., Zhong, X., Zeng, J., Liang, K., Pan, J., Xin, Y., Liu, Y., Hu, X., Peng, B., Chen, R., Hu, R., 2021. Improving grain yield, nitrogen use efficiency and radiation use efficiency by dense planting, with delayed and reduced nitrogen application, in double cropping rice in South China. *J. Integr. Agric.* 20 (2), 565-580. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63380-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63380-9).
- García, A. C., Castro, T. A. V. T., Barbara, R. L. L., Elias, S. S., Amaral Sobrinho, N. M. B., Pereira, M. G., Zonta, E. 2019. Revisión Sobre la Relación Estructura-Función de las Sustancias Húmicas y su Regulación del Metabolismo Oxidativo en Plantas Críticas. (Obtenido en <http://rvq.sbbq.org.br>).
- García, A.C., Santos, L.A., Izquierdo, F.G., Sperandio, M.V.L., Castro, R.N., Barbara, R.L. L., 2012. Ácidos húmicos de vermicompost como vía ecológica para proteger la planta de arroz contra el estrés oxidativo. *Ecol. Eng.* 47, 203-208. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.011>.
- García, A.C., Santos, L.A., de Souza, L.G.A., Tavares, O.C.H., Zonta, E., Gomes, E.T.M., García-Mina, J.M., Barbara, R.L.L., 2016. Los ácidos húmicos del vermicompost modulan la acumulación y el metabolismo de ROS en plantas de arroz. *J. Plant Physiol.* 192, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.01.008>.
- Gerardin, T., Douthe, C., Flexas, J., Brendel, O., 2018. Shade and drought growth conditions strongly impact dynamic responses of stomata to variations in irradiance in *Nicotiana tabacum*. *Environ. Exp. Bot.* 153, 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.019>.
- Gerum, A.D.A., Santos, G.S., Santana, M.D.A., Souza, J.D.S., Cardoso, C.E.L., 2019. *Fruticultura Tropical: potenciais riscos e seus impactos. Cruz das Almas*, p. 128.
- Gerzabek, M.H., Aquino, A.J.A., Balboa, Y.I.E., Galicia-Andrés, E., Granc'ic, P., Oostenbrink, C., Petrov, D., Tunega, D., 2022. A contribution of molecular modeling to supramolecular structures in soil organic matter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 185 (1), 44-59. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100360>.
- Ghanbarpour, E., Rezaei, M., Lawson, S., 2019. Reducción del agrietamiento en frutos de granado tras la aplicación foliar de ácido húmico, boro cálcico y caolín durante el estrés hídrico. *Erwerbs-obstbau* 61 (1), 29-37. <https://doi.org/10.1007/s10341-018-0386-6>.
- Haider, F.U., Liqun, C., Coulter, J.A., Cheema, S.A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., Farooq, M., 2021. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>.
- Hasan, A.M., 2019. Efecto de la aplicación foliar de ácido húmico y benciladenina en crecimiento y floración de caléndula de maceta (*Calendula officinalis* L.). *J. Univ. Duhok* 22 (1), 69-77. <https://doi.org/10.26682/avuod.2019.22.1.7>.
- Hassan, H., Fahmy, A., 2020. Effect of foliar spray with proline and humic acid on productivity and essential oil content of chamomile plant under different rates of organic fertilizers in sandy soil. *J. Plant Product.* 11 (1), 71-77. <https://doi.org/10.21608/jpp.2020.79156>.
- Hatami, E., Shokouhian, A.A., Ghanbari, A.R., Naseri, L.A., 2018. Alleviating salt stress in almond rootstocks using of humic acid. *Sci. Hortic.* 237, 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.034>.
- Hernández, O.L., Calderín, A., Huelva, R., Martínez-Balmori, D., Guridi, F., Aguiar, N. O., Olivares, F.L., Pasqualoto Canellas, L., 2015. Las sustancias húmicas del vermicompost mejoran la producción urbana de lechuga. *Agronomy Sustain. Dev.* 35 (1). <https://doi.org/10.1007/s13593>.
- Hernández, R., Robles, C., Calderín, A., Guridi, F., Reynaldo, I.M., González, D., 2018. Efectos anti estrés de ácidos húmicos de vermicompost en dos cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales* 39 (2), 65-74.
- Huang, S., Wang, P., Yamaji, N., Ma, J.F., 2020. 1 de junio Nutrición vegetal para la nutrición humana: Hints from Rice Research and Future Perspectives. *Mol. Plant Cell Press*. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.05.007>.
- Jan, J.A., Nabi, G., Khan, M., Ahmad, S., Shah, P.S., Hussain, S., Sehrish, S., 2020. La aplicación foliar de ácido húmico mejora el crecimiento y el rendimiento de las variedades de chile (*Capsicum annum* L.). *Pak. J. Agric. Res.* 33 (3). <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.3.461.472>.
- Jawad, R.M., Majeed, B.H., 2017. Caracteres florales de gerbera (*Gerbera jamesonii*) afectados por la aplicación foliar de ácido húmico y cloruro de calcio. *Zagazig J. Agric. Res* 44 (3).
- Jeffree, C. E. 2007. La estructura fina de la cutícula vegetal. En: *Annual Plant Reviews*. Vol. 23, pp. 11-125. Wiley Blackwell.
- Jindo, K., Olivares, F.L., da Malcher, D.J., Sánchez-Monedero, M.A., Kempenaar, C., Canellas, L.P., 2020. From lab to field: role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. *Front. Plant Sci. Front Media S.A.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426>.
- Jung, H., Kwon, S., Kim, J., Jeon, J., 2021. ¿Qué características de las sustancias húmicas se investigan para mejorar su valor agronómico? *Molecules* 26 (760), 1-10. <https://doi.org/10.3390/molecules>.
- Kamel, S.M., Afifi, M.M.I., El-shoraky, F.S., El-Sawy, M.M., 2014. Ácido fúlvico: una herramienta para el control de oídio y mildiu en plantas de pepino. *Int. J. Phytopathol.* 3 (2), 101-108. <https://doi.org/10.3389/phytopath.003.02.0866>.
- Kandil, E.E., Abdelsalam, N.R., el Aziz, A.A.A., Ali, H.M., Siddiqui, M.H., 2020. Efficacy of nanofertilizer, fulvic acid and boron fertilizer on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield and quality. *Sugar Tech* 22 (5), 782-791. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00837-8>.
- Kandil, A.A., Sharief, A.E., Fathalla, F.H., 2012. Onion yield as affected by foliar application with amino and humic acids under nitrogen fertilizer levels. *ESci J. Crop Product.* 02 (02), 62-72.
- Karakurt, Y., Unlu, H., Unlu, H., Padem, H., 2009. La influencia de la fertilización foliar y del suelo de ácido húmico en el rendimiento y la calidad de la pimienta. *Acta Agric. Scand. B. Soil Plant Sci.* 59 (3), 233-237. <https://doi.org/10.1080/09064710802022952>.
- Karakurt, Y., Ozdamar-Unlu, H., Unlu, H., Tonguc, M., 2015. Antioxidant compounds and activity in cucumber fruit in response to foliar and soil humic acid application. *Eur. J. Hortic. Sci.* 80 (2), 76-80. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.2.5>.
- Katkat, A., Çelik, H., Turan, M.A., Asy'k, B.B., 2009. Effects of soil and foliar applications of humic substances on dry weight and mineral nutrients uptake of wheat under calcareous soil conditions. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 3 (2), 1266-1273.
- Kaya, M., Atak, M., Khawar, M., Çiftçi, C.Y., Özcan, S., 2005. Effect of pre-sowing seed treatment with zinc and foliar spray of humic acids on yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Int. J. Agric. e Biol.* 7 (6), 875-878.
- Kaya, C., Şnbayram, M., Akram, N.A., Ashraf, M., Alyemeni, M.N., Ahmad, P., 2020. Sulfur-enriched Leonardite and humic acid soil amendments enhance tolerance to drought and phosphorus deficiency stress in maize (*Zea mays* L.). *Sci. Rep.* 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62669-6>.
- Kazemi, M., 2013. Efecto de la aplicación foliar de ácido húmico y nitrato potásico en el crecimiento del pepino. *Env. Pharmacol. Life Sci* 2 (11), 3-06.
- Khaled, H., Fawy, H.A., 2011. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil & Water Res.* 6 (1), 21-29.
- Khan, M.A., Asaf, S., Khan, A.L., Jan, R., Kang, S.M., Kim, K.M., Lee, J.J., 2020. Extensión de la termotolerancia a las plántulas de tomate mediante la inoculación con SA1 aislado de *Bacillus cereus* y la comparación con la aplicación de ácido húmico exógeno. *PLoS One* 15 (4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232228>.
- Khorasaninejad, S., Alizadeh Ahmadabadi, A., Hemmati, K., 2018. El efecto del ácido húmico sobre las propiedades morfofisiológicas y fitoquímicas foliares de *Echinacea purpurea* L. bajo estrés por déficit hídrico. *Sci. Hortic.* 239, 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.015>.
- Kishor, M., Jayakumar, M., Gokavi, N., Mukharib, D.S., Raghuramulu, Y., Udayar Pillai, S., 2021. Humic acid as foliar and soil application improve the growth, yield and quality of coffee (cv. C × R) in Western Ghats of India. *J. Sci. Food Agric.* 101 (6), 2273-2283. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10848>.
- Kovalchuk, N.M., Simmons, M.J.H., 2021. Surfactant-mediated wetting and spreading: recent advances and applications. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 51. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.07.004>.
- Kritzinger, I., Lötze, E., 2019. Cuantificación de lenticelas en cultivares de ciruela japonesa y su efecto en la permeabilidad total de la cáscara de la fruta. *Sci. Hortic.* 254, 35-39. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.082>.
- Leite, J.M., Pitumpe Arachchige, P.S., Ciampitti, I.A., Hettiarachchi, G.M., Maurmann, L., Trivelin, P.C.O., Prasad, P.V.V., Sunoj, S.V.J., 2020. Co-addition of humic substances and humic acids with urea enhances foliar nitrogen use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Heliyon* 6 (10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05100>.
- Lenßen, A.W., Olk, D.C., Dinnes, D.L., 2019. La aplicación de un producto húmico formulado puede aumentar el rendimiento de la soja. *Crop, Forage & Turfgrass Manage.* 5, (1). <https://doi.org/10.2134/cftm2018.07.0053> 180053.
- Leventoglu, H., Erdal, I., 2014. Efecto de altos niveles de sustancias húmicas sobre el crecimiento y la concentración de nutrientes del maíz en condiciones calcáreas. *J. Plant Nutr.* 37 (12), 2074-2084. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920373>.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D., Henry, K., Hottle, R., Jackson, H., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeldt, H., Remington, T., Sen, P.T., Sessa, R., Shula, R., Tibu, A., Torquebiau, E.F., 2014. Agricultura climáticamente inteligente para la seguridad alimentaria. *Nature Climate Change* 4, 1068-1072. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>.
- Liu, A., Contador, C.A., Fan, K., Lam, H.M., 2018. Interacción y regulación de los metabolismos del carbono, nitrógeno y fósforo en nódulos radiculares de leguminosas. *Plant Sci. Front. Media S.A.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01860>.
- Lotfi, R., Pesarakli, M., Gharavi-Kouchebagh, P., Khoshvaghti, H., 2015. Respuestas fisiológicas de *Brassica napus* al ácido fúlvico bajo estrés hídrico: Fluorescencia de la clorofila a y actividad de enzimas antioxidantes. *Crop J.* 3 (5), 434-439. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.05.006>.
- Mahmoudi, M., Samavat, S., Mostafavi, M., Khalighi, A., Cherati, A., 2014. The effects of humic acid and proline on morphological properties of *Actinidia Deliciosa* cv. Hayward under salinity. *J. Appl. Sci. Agric.* 9 (1), 261-267.
- Maibodi, N.D.H., Kaf, M., Nikbakht, A., Rejali, F., 2015. Efecto de las aplicaciones foliares de ácido húmico sobre el crecimiento, la calidad visual, el contenido de nutrientes y los parámetros radiculares del raigrás perenne (*Lolium Perenne* L.). *J. Plant Nutr.* 38 (2), 224-236. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.939759>.
- Manas, D., Soumya, G., Kheyali, S., 2014. Efecto de la aplicación de ácido húmico en la acumulación de la nutrición mineral y la pungencia en el ajo (*Allium sativum* L.). *Int. J. Biotechnol. Mol. Biol. Res.* 5 (2), 7-12. <https://doi.org/10.5897/ijbmr2014.0186>.
- Man-hong, Y., Lei, Z., Sheng-tao, X., McLaughlin, N.B., Jing-hui, L., 2020. Effect of water soluble humic acid applied to potato foliage on plant growth, photosynthesis characteristics and fresh tuber yield under different water deficits. *Sci. Rep.* 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63925-5>.
- Mazhar, A.A.M., Shedeed, S.I., Abdel-Aziz, M.G., Mahgoub, M.H., 2012. Crecimiento, floración y constituyentes químicos de la planta *Chrysanthemum indicum* L. en respuesta a diferentes niveles de ácido húmico y salinidad. *J. Appl. Sci. Res.* 8 (7), 3697-3706.

- Meena, M.K., Dhanoji, M.M., Chandra Naik, M., 2018. Influencia de la pulverización foliar de ácido húmico sobre los índices fisiológicos de crecimiento en Redgram (*Cajanus cajan*). *Farmacología y ciencias de la vida Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.*, 57-63
- Merget, A., 1873. Sur des phenomenes de thermodiffusion gazeuse qui se produisent dans les feuilles et sur les mouvements circulatoires qui en resultent dans l'acte de la respiration chlorophyllienne. *Compt. Rend. Acad. Sci.* 77, 1468-1472.
- Mocellin, R. S. P. 2004. Principios das adubação foliar. Canoas.
- Monda, H., Cozzolino, V., Vinci, G., Drosos, M., Savy, D., Piccolo, A., 2018. Composición molecular del Humeome extraído de diferentes compostas verdes y su bioestimulación sobre el crecimiento temprano del maíz. *Plant and Soil* 429 (1-2), 407-424. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3642-5>.
- Monda, H., McKenna, A.M., Fountain, R., Lamar, R.T., 2021. Bioactivity of Humic Acids Extracted From Shale Ore: Molecular Characterization and Structure-Activity Relationship With Tomato Plant Yield Under Nutritional Stress. *Front. Plant Sci.* 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.660224>.
- Muscolo, A., Sidari, M., Nardi, S., 2013. Sustancia húmica: Relación entre estructura y actividad. información más profunda sugiere hallazgos unívocos. *J. Geochem. Explor.* 129, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.012>.
- Nachtiqau, G.R., Nava, G., 2010. Adubación foliar: Fatos e mitos. *Agropecuária Catarinense* 23 (2), 87-97.
- Najarian, A., Souri, M.K., Nabigol, A., 2022. Influence of humic substance on vegetative growth, flowering and leaf mineral elements of *Pelargonium x hortorum*. *J. Plant Nutr.* 45 (1), 107-112.
- Nardi, S., Panuccio, M.R., Abenavoli, M.R., Muscolo, A., 1994. Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora caliginosa* and *A. Rosea*. *Soil Biol. Biochem* 26 (10), 1341-1346.
- Nardi, S., Concheri, G., Pizzeghello, D., Sturaro, A., Rella, R., Parvoli, G., 2000a. Soil organic matter mobilization by root exudates. *Chemosphere* 41, 653-658.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Reniero, F., Rascio, N., 2000b. Chemical and biochemical properties of humic substances isolated from forest soils and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 (2), 639-645. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642639x>.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Ertani, A., 2018. Actividad similar a las hormonas de la materia orgánica del suelo. *Appl. Soil Ecol.* 123, 517-520. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.04.020>.
- Nardi, S., Schiavon, M., Francioso, O., 2021. Estructura química y actividad biológica de las sustancias húmicas definen su papel como promotores del crecimiento vegetal. *Molecules* MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>.
- Nebbioso, A., Piccolo, A., Lamshöft, M., Spiteller, M., 2014. Caracterización molecular de un residuo final de humeómica aplicada a un ácido húmico del suelo. *RSC Adv.* 4 (45), 23658-23665. <https://doi.org/10.1039/c4ra01619j>.
- Ngullie, C.R., Tank, R.V., Bhandari, D.R., 2014. Effect of salicylic acid and humic acid on flowering, fruiting, yield and quality of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Kesar. *Adv. Res. J. Crop Improvement* 5 (2), 136-139. <https://doi.org/10.15740/has/arjci/5.2/136-139>.
- O'Donnell, R.W., 1972. The auxin-like effects of humic preparations from leonardite. *Soil Sci.* 116 (2), 106-112.
- Olaetxea, M., de Hita, D., Garcia, C.A., Fuentes, M., Baigorri, R., Mora, V., Garnica, M., Urrutia, O., Erro, J., Zamarreño, A.M., Barbara, R.L., Garcia-Mina, J.M., 2018. Marco hipotético que integra los principales mecanismos implicados en la acción promotora de las sustancias húmicas rizosféricas sobre el crecimiento de raíces y brotes de plantas. *Appl. Soil Ecol.* 123, 521-537. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.007>.
- Olaetxea, M., Mora, V., Bacaicoa, E., Baigorri, R., Garnica, M., Fuentes, M., Zamarreño, A.M., Spichal, L., García-Mina, J.M., 2019. El ABA radicular y la H⁺-ATPasa son actores clave en la acción promotora del crecimiento de raíces y brotes de los ácidos húmicos. *Plant Direct* 3 (10). <https://doi.org/10.1002/pld3.175>.
- Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Rosa, R.C.C., Canellas, L.P., 2015. La biofortificación del sustrato en combinación con pulverizaciones foliares de bacterias promotoras del crecimiento vegetal y sustancias húmicas potencia la producción de tomate ecológico. *Sci. Hortic.* 183 (1), 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.012>.
- Oliveira Amatuzzi, J., Francisco Mógor, Á., Mógor, G., Bochetti de Lara, G., 2020. Novedoso uso de algas calcáreas como bioestimulante vegetal. *J. Appl. Phycol.* 32, 2023- 2030. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02077-5/Published>.
- Olk, D.C., Dinnes, D.L., Rene Scoresby, J., Callaway, C.R., Darlington, J.W., 2018. Productos húmicos en la agricultura: beneficios potenciales y desafíos de investigación-una revisión. *J. Soil. Sediment.* 18 (8), 2881-2891. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1916-4>.
- Osman, E.A.M., El-Masry, A.A., Khatib, K.A., 2013. Efecto de las fuentes de fertilizantes nitrogenados y la pulverización foliar de ácidos húmicos y/o fúlvicos sobre el rendimiento y la calidad de las plantas de arroz. *Pelagia Res. Library Adv. Appl. Sci. Res.* 4 (4), 174-183.
- Osvalde, A., Karlsons, A., C'ekstere, G., Ma I ecka, S. 2013. Efecto de las sustancias húmicas sobre el estado nutricional y el rendimiento de la cebolla (*Allium Cepa* L.) en condiciones de campo. En: *Actas de la Academia de Ciencias de Letonia. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 66(4-5), 192-199. doi: 10.2478/v10046-012-0028-6.
- Ozfidan-Konakci, C., Yildiztugay, E., Bahtiyar, M., Kucukoduk, M., 2018. Los cambios inducidos por el ácido húmico en el estado hídrico, la fluorescencia de la clorofila y los sistemas de defensa antioxidante de las hojas de trigo con estrés por cadmio. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 155, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.071>.
- Perminova, I., García-Mina, J.M., Knicker, H., Miano, T., 2019. Sustancias húmicas y tecnologías similares a la naturaleza: Aprendiendo de la naturaleza: comprensión de las estructuras e interacciones de las sustancias húmicas para el desarrollo de tecnologías respetuosas con el medio ambiente y similares a la naturaleza. *J. Soil. Sediment.* 19 (6), 2663-2664. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02330-6>.

- Q. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Barbosa, D. Franca de Oliveira Torchia et al., Piccolo, A., 2002. La estructura supramolecular de las sustancias húmicas: A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. *Adv. Agron.* 75, 57-134. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(02\)75003-7](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(02)75003-7).
- Pittarello, M., Busato, J.G., Carletti, P., Zanetti, L.V., da Silva, J., Dobbss, L.B., 2018. Efectos de diferentes concentraciones de sustancias húmicas sobre la anatomía de las raíces y la acumulación de Cd en plántulas de *Avicennia germinans* (mangle negro). *Mar. Pollut. Bull.* 130, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.005>.
- Pizzeghello, D., Nicolini, G., Nardi, S., 2002. Hormone-like activities of humic substances in different forest ecosystems. *New Phytol.* 155 (3), 393-402. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00475.x>.
- Pizzeghello, D., Francioso, O., Ertani, A., Muscolo, A., Nardi, S., 2013. Isopentenyladenosine and cytokinin-like activity of different humic substances. *J. Geochem. Explor.* 129, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.007>.
- Pizzeghello, D., Schiavon, M., Francioso, O., Dalla Vecchia, F., Ertani, A., Nardi, S., 2020. Bioactivity of size-fractionated and unfractionated humic substances from two forest soils and comparative effects on n and s metabolism, nutrition, and root anatomy of *Allium sativum* L. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01203>.
- Popescu, G.C., Popescu, M., 2018. Rendimiento, calidad de la baya y respuesta fisiológica de la vid a la aplicación foliar de ácido húmico. *Bragantia* 77 (2), 273-282. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017030>.
- Portu, J., González-Arenzana, L., Hermosín-Gutiérrez, I., Santamaría, P., Garde-Cerdán, T., 2015. Aplicaciones foliares de fenilalanina y urea en vid: efecto sobre el contenido fenólico del vino. *Food Chem.* 180, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.008>.
- Qiu, C., Sun, J., Shen, J., Zhang, S., Ding, Y., Gai, Z., Fan, K., Song, L., Chen, B., Ding, Z., Wang, Y., 2021. Fulvic acid enhances drought resistance in tea plants by regulating the starch and sucrose metabolism and certain secondary metabolism. *J. Proteomics* 247. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2021.104337>.
- Rachid, A.F., Rahem Bader, B., Al-Alawy, H.H., 2020. Effect of foliar application of humic acid and nanocalcium on some growth, production, and photosynthetic pigments of cauliflower (*Brassica oleracea* var *Botrytis*) planted in calcareous soil. *Plant Arch.* 20, 32-37.
- Raheem, S., Ibrahim Al-Jaf, H., Raheem, S.M., Al-Jaf, H.I., Tofiq, G.K., 2018. Influencia de la aplicación foliar y al suelo de ácido húmico en el crecimiento y rendimiento de la lechuga. *Euphrates J. Agric. Sci.* 10 (2), 199-204.
- Razavi Nasab, A., Fotovat, A., Astaraie, A., Tajabadipour, A., 2019. Efecto de residuos orgánicos y ácido húmico en algunos parámetros de crecimiento y concentración de nutrientes de plántulas de pistacho. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 50 (3), 254-264. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1559328>.
- Reddy, K., Bhuvanewari, R., Karthikeyan, P.K., 2020. Effect of dap, humic acid and micronutrient mixture foliar application on yield and quality characters of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) Var. Tmv 7 en suelo franco arenoso. Vol. 20 p. 521- 525.
- Reyes Pérez, J.J., Izquierdo, F.G., Escobar, I.M.R., Ortega, Y.R., Mayoral, J.A.L., Amador, B.M., Espinoza, F.H.R., Fabre, T.B., Amador, C.A., Silvera, C.M.O., Morales, Y.A., Milanés, J.Y.R., 2011. Efectos del humus líquido sobre algunos parámetros decalidad interna en frutos de tomate cultivados encondiciones de estrés salino. *Centro Agrícola* 38 (3), 57-61.
- Ribeiro, F.E., del Peloso, M.J., Barbosa, F.R., de Gonzaga, A.C., de Oliveira, L.F.C., 2011. Recomendações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. *Circular técnica* 89, 1-64.
- Rodrigues, E.S., Montanha, G.S., Marques, J.P.R., de Almeida, E., Yabuki, L.N.M., Menegário, A.A., Pereira de Carvalho, H.W., 2020. Aplicación foliar de elementos de tierras raras en soja (*Glycine max* (L)): Efectos sobre la biometría y caracterización de la fitotoxicidad. *J. Rare Earths* 38 (10), 1131-1139. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.09.004>.
- Rodrigues, L.U., Ribeiro Da Silva, R., Araújo De Freitas, G., Carlos, A., dos Santos, M., De, R., Tavares, C., 2018. *Applied Research & Agrotechnology* vol 11, n.2, may/ aug. <https://doi.org/10.5935/PAET.V11.N2.11>.
- Rose, M.T., Patti, A.F., Little, K.R., Brown, A.L., Jackson, W.R., Cavagnaro, T.R., 2014. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: Implicaciones prácticas para la agricultura. En: *Advances in Agronomy*. Vol. 124, pp. 37-89. Academic Press Inc.
- Sachs, J., 1884. Ein Beitrag zur Kenntniss der Ernähringsthätigkeit der Blü Arbeit. *Botan. Inst. Würzburg* 3, 1-33.
- Safaei, Z., Azizi, M., Davarynejad, G., Aroee, H., 2014. The Effect of Foliar Application of Humic Acid and Nanofertilizer (Pharmks) on Yield and Yield Components of Black Cumin (*Nigella sativa* L.). *J. Subproductos de Plantas Medicinales*. 2, 133-140.
- Saidimoradi, D., Ghaderi, N., Javadi, T., 2019. Mitigación del estrés por salinidad mediante la aplicación de ácido húmico en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Sci. Hortic.* 256. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108594>.
- Sant'Anna, S.A.C., Martins, M.R., Goulart, J.M., Araújo, S.N., Araújo, E.S., Zaman, M., Jantalia, C.P., Alves, B.J.R., Boddey, R.M., Urquiaga, S., 2018. Fijación biológica de nitrógeno y emisiones de N₂O del suelo por residuos de leguminosas en un Acrisol del SE de Brasil. *Geoderma Reg.* 15. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00196>.
- Santoyo, L.F.R., González, G.A., Escobar, M.O., Estrada, A.E., Hernández, M.S., García, P.S., 1998. Fertilización foliar orgánica e inorgánica y rendimiento de sorgo en condiciones de salinidad. *Terra* 16 (3), 205-210.
- Savy, D., Brostaux, Y., Cozzolino, V., Delaplace, P., du Jardin, P., Piccolo, A., 2020. Quantitative structure-activity relationship of humic-like biostimulants derived from agro-industrial byproducts and energy crops. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00581>.

- Schreel, J.D.M., Steppe, K., 2020. Absorción foliar de agua en árboles: ¿despreciable o necesaria? *Trends Plant Sci.* 25 (6), 590-603. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.01.003>.
- Shahabivand, S., Padash, A., Aghae, A., Nasiri, Y., Rezaei, P.F., 2018. Los bioestimulantes de la planta (*Funneliformis mosseae* y sustancias húmicas) en lugar de fertilizantes químicos mejoraron las respuestas bioquímicas en la menta. *Iranian J. Plant Physiol.* 8 (2), 2333-2344. <https://doi.org/10.22034/ijpp.2018.539109>.
- Shindhe, V., Dhanoji, M.M., Meena, M.K., Patil, R.P., 2020. Influencia de la nutrición orgánica foliar en el crecimiento, rendimiento y componentes de rendimiento de girasol. *J. Pharmacognosy Phytochem.* 9 (1), 1267-1269.
- Silva-Matos, R.R.S., Cavalcante, I.H.L., Júnior, G.B.S., Albano, F.G., Cunha, M.S., Beckmann-Cavalcante, M.Z., 2012. Pulverización foliar de sustancias húmicas en la producción de plántulas de sandía cv. Crinson dulce. *J. Agron.* 11 (2), 60-64.
- Sindha, D.J., Satodiya, B.N., Sutariya, N.K., 2018. Efecto de la aplicación foliar de diferentes productos químicos y ácido húmico sobre el rendimiento y la calidad de la fruta de chirimoya (*Annona squamosa* L.) cv local. *Int. J. Chem. Stud.* 6 (5), 75-77.
- Sladky, Z., 1959. Aplicación de sustancias extraídas del humus a las partes aéreas de las plantas. *Biol. Plant.* 1 (3), 199-204.
- Souri, M.K., Hatamian, M., 2019. Los aminoquelatos en la nutrición de las plantas: una revisión. *J. Plant Nutr.* 42 (1), 67-78.
- Stevenson, F.J., 1994. Química del humus. Génesis, composición, reacciones. John Wiley and Sons, Nueva York.
- Suh, H.Y., Yoo, K.S., Suh, S.G., 2014. Tuber growth and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) as affected by foliar or soil application of fulvic and humic acids. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 55 (3), 183-189. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0005-x>.
- Susithra, M., Balasubramanian, A., Gobi, R., Sathiyamurthi, S., 2019. Maximización del rendimiento con manejo de nutrientes y prácticas de vivero en grano rojo trasplantado (*Cajanus cajan* (L) MILLSP.). *Plantas Arch.* 19 (1), 323-326. Tagliavini, M., Toselli, M., 2005. Aplicaciones foliares de nutrientes. *Food-Web Interacciones*, 53-59.
- Tavares, O.C.H., Santos, L.A., Ferreira, L.M., Sperandio, M.V.L., Da Rocha, J.G., García, A.C., Dobbss, L.B., Barbara, R.L.L., De Souza, S.R., Fernandes, M.S., 2017. El ácido húmico mejora diferencialmente la cinética de nitrato bajo sistemas de baja y alta afinidad y altera la expresión de H⁺-ATPasas de membrana plasmática y transportadores de nitrato en arroz. *Annals of Applied Biology* 170, 89-103. <https://doi.org/10.1111/aab.12317>.
- Tei, F., de Neve, S., de Haan, J., Kristensen, H.L., 2020. Gestión del nitrógeno en cultivos hortícolas. *Agric. Water Manage.* 240. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106316>.
- Tejada, M., González, J.L., 2003. Influencia de la fertilización foliar con aminoácidos y ácidos húmicos sobre la productividad y calidad del espárrago. *Biol. Agric. Hortic.* 21 (3), 277-291. <https://doi.org/10.1080/01448765.2003.9755270>.
- Tejada, M., Rodríguez-Morgado, B., Paneque, P., Parrado, J., 2018. Efectos de la fertilización foliar de un bioestimulante obtenido a partir de plumas de pollo sobre el rendimiento de maíz. *Eur. J. Agron.* 96, 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.003>.
- Teli, S.B., Mawiade, P., Yenagi, B., Kuligod, V., 2020. Soil and foliar application of humic acid on productivity of groundnut (*Arachis hypogea* L.). *Int. J. Chemical Stud.* 8 (1), 1315-1318. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1r.8438>.
- Terra, S.B., Oliveira, D.P.P., 2013. Floricultura: a produção de flores como uma nova alternativa de emprego e renda para a comunidade de Bagé-RS. *Revista Conexão UEPG* 9 (2), 342-353.
- Thakur, H., Rekha, K.B., Giri, Y.Y., Babu, S.N.S., Padmaja, G., 2017. Physico-Chemical Properties And Microbial Count Of Soil After Harvest Of Sunflower (*Helianthus Annuus* L.) As Influenced By Humic Acid And Fulvic Acid. *Bull. Environ. Pharmacol. Life Sci.* 6 (3), 413-416.
- Tranvik, L.J., 2014. *Distrofia en sistemas de agua dulce*. Módulo de referencia en sistemas terrestres y ciencias ambientales. Elsevier.
- Urrutia, O., Fuentes, M., Olaetxea, M., Garnica, M., Baigorri, R., Zamarreño, A. M., Movila, M., de Hita, D., García-Mina, J. M. 2020. Efecto de la materia orgánica del suelo sobre la nutrición mineral de las plantas. En: Z. Rengel (Ed.), *Achieving sustainable crop nutrition*. pp. 291-306.
- Vaccaro, S., Ertani, A., Nebbioso, A., Muscolo, A., Quaggiotti, S., Piccolo, A., Nardi, S., 2015. Humic substances stimulate maize nitrogen assimilation and amino acid metabolism at physiological and molecular level. *Chem. Biol. Biol. Agric.* 2 (1). <https://doi.org/10.1186/s40538-015-0033-5>.
- van Tol de Castro, T.A., García, A.C., Tavares, O.C.H., Pereira, E.G., de Souza, C.D.C.B., Torchia, D.F.D.O., de Pinho, C.F., Castro, R.N., 2022. Los ácidos húmicos afectan eficiencia cuántica fotosintética en arroz bajo déficit hídrico. *Theor. Exp. Plant Physiol.* <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00258-w>.
- van Wissenlingh, C., 1895. Sur la cuticularisation et la cutine. *Neerland. Sc.Exact. Natur.* 28, 373-410.
- Vani, K., Rekha, B., Divya, G., Vani, K.P., Rekha, K.B., Divya, G., Nalini, N., 2017. Organic farming in Groundnut View project Quality parameters of nutri-cereal browntop millet through agronomic practices View project Performance of summer sesamum (*Sesamum indicum* L.) under integrated nutrient management. *J. Pharmacognosy Phytochem.* 6 (5).
- Varanini, Z., Pinton, R., 1995. Humic Substances and Plant Nutrition. *Progreso en Botánica*, 97-117.
- Villegas-Espinoza, J.A., Reyes-Pérez, J.J., Nieto-Garibay, A., Higinio Ruiz-Espinoza, F., Cruz-Falcón, A., Murillo-Amador, B., 2018. Bioestimulante Liplant®: su efecto en *Solanum lycopersicum* (L.) cultivado en suelos ligeramente salinos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Especial* 20, 4137-4147.
- von Dohl, 1947. Untersuchung der frage: bildet die cellulose die grundlage sammtlicher vegetabilixchen membranen? *Bot Zeitung* 5, 497-505.
- Wadas, W., Dziugiel, T., 2020. Cambios en el área de asimilación y el contenido de clorofila de cultivares muy tempranos de patata (*Solanum tuberosum* L.) influenciados por bioestimulantes. *Agronomy* 10 (3). <https://doi.org/10.3390/agronomy10030387>.
- Wang, S., Tian, X., Liu, Q., 2020. La eficacia de las aplicaciones foliares de zinc y bioestimulantes para aumentar la concentración de zinc y la biodisponibilidad del grano de trigo. *Agronomy* 10 (2). <https://doi.org/10.3390/agronomy10020178>.
- Wang, Y., Yang, R., Zheng, J., Shen, Z., Xu, X., 2019. La aplicación foliar exógena de ácido fúlvico alivia la toxicidad por cadmio en lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 167, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.064>.
- Xudan, X., 1986. The effect of foliar application of fulvic acid on water use, nutrient uptake and yield in wheat. *Aust. J. Agr. Res.* 37 (4), 343-350. <https://doi.org/10.1071/AR9860343>.
- Yadav, G., Meena, M., 2021. Bioprospecting of endophytes in medicinal plants of Thar Desert: an attractive resource for biopharmaceuticals. *Biotechnol. Rep.* 30. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00629>.
- Yildirim, E., Ekinci, M., Turan, M., Ağar, G., Dursun, A., Kul, R., Alim, Z., Argin, S., 2021. Humic + Fulvic acid mitigated Cd adverse effects on plant growth, physiology and biochemical properties of garden cress. *Sci. Rep.* 11 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94860-8>.
- Yu, X., Yang, J., Wang, E., Li, B., Yuan, H., 2015. Efectos de la etapa de crecimiento y el ácido fúlvico en la diversidad y dinámica de la comunidad bacteriana endófitas en hojas de stevia rebaudiana bertonii. *Front. Microbiol.* 6 (AUG). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00867>.
- Zafar, S., Li, Y.L., Li, N.N., Zhu, K.M., Tan, X.L., 2019. Avances recientes en la mejora del contenido de aceite en cultivos de semillas oleaginosas. *J. Biotechnol.* 301, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.05.307>.
- Zandonadi, D.B., Canellas, L.P., Façanha, A.R., 2007. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺pumps activation. *Planta* 225, 1583-1595.
- Zandonadi, D.B., Santos, M.P., Dobbss, L.B., Olivares, F.L., Canellas, L.P., Binzel, M.L., Okorokova-Façanha, A.L., Façanha, A.R., 2010. Nitric oxide mediates humic acids-induced root development and plasma membrane H⁺-ATPase activation. *Planta* 231 (5), 1025-1036. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1106-0>.
- Zandonadi, D.B., Santos, M.P.S., Medici, L.O., Silva, J., 2014. Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. *Hortic. Bras.* 32, 14-20.
- Zanin, S., Lidron, E., Rizzuto, R., Pallafacchina, G. 2019. Methods to measure intracellular Ca²⁺ concentration using Ca²⁺-sensitive dyes. In: *Methods in Molecular Biology*. Vol. 1925, pp. 43-58. Humana Press Inc.
- Zárate, N.A.H., Vieira, M.C., 2017. *Hortas: conhecimentos básicos*. Siriema; Dourados: MS, pp. 1-289.
- Zhou, J., Zhang, C., Du, B., Cui, H., Fan, X., Zhou, D., Zhou, J., 2021. Soil and foliar applications of silicon and selenium effects on cadmium accumulation and plant growth by modulation of antioxidant system and Cd translocation: comparison of soft vs. durum wheat varieties. *J. Hazard. Mater.* 402. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123546>.
- Zotarelli, L., Zatorre, N.P., Boddey, R.M., Urquiaga, S., Jantalia, C.P., Franchini, J.C., Alves, B.J.R., 2012. Influencia de la siembra directa y la frecuencia de una leguminosa de abono verde en las rotaciones de cultivos para equilibrar las salidas de N y preservar las reservas de C orgánico del suelo. *Field Crop Res* 132, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.013>.