

Biochar y su contribución a la nutrición, crecimiento y defensa de las plantas



Biochar and its contribution to plant nutrition, growth and defense

<https://eqrcode.co/a/rAlVdb>

Ivonne González-Marquetti¹, Mayra G. Rodríguez¹,
 Belkis Peteira Delgado-Oramas^{1*}, Hans-Peter Schmidt²

¹Dirección de Sanidad Vegetal. Centro Nacional de Sanidad Agropecuaria (CENSA). Apartado 10. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

²Ithaka Institute for Carbon Strategies, Switzerland.

RESUMEN: El biochar es el carbón negro rico en C usado para mejorar la fertilidad de los suelos. Este producto se propone como una de las alternativas para enfrentar el cambio climático, debido a su capacidad para secuestrar carbono atmosférico. Sus características físico-químicas están influenciadas por el tipo de biomasa y las condiciones en las que se desarrolla la pirólisis. Se demostró que este material puede poseer altos contenidos de N, P, K, Mg, Mn, Na, Ca, Cu, Zn, Co, Si, Mo, Cr, Ni y otros elementos trazas. La aplicación de biochar en el suelo puede inducir cambios morfofisiológicos y metabólicos en las plantas y mejorar las interacciones que establecen con los microorganismos del suelo, entre los que se incluyen los hongos micorrícicos arbusculares, las bacterias promotoras de crecimiento vegetal y los hongos antagonistas como *Trichoderma*. El biochar puede ser enriquecido o combinado con compost, fertilizantes y microorganismos benéficos, lo que promueve el crecimiento y la defensa de las plantas contra diversas plagas. El efecto interactivo de biochar con las lombrices de tierra es de tipo suelo-específica, debido a que depende de la calidad del suelo en el que se pongan en contacto. Además, el biochar es capaz de suprimir diversas plagas del suelo e inducir resistencia sistémica contra patógenos foliares en algunas plantas. Los objetivos de este trabajo fueron analizar y resumir aspectos relativos al biochar y la nutrición vegetal, promoción del crecimiento vegetal; biochar y otros organismos de suelo que favorecen el crecimiento y desarrollo de las plantas, la relación de este producto con la disminución/supresión de plagas y la defensa de las plantas, así como algunas consideraciones sobre su aplicación.

Palabras clave: resistencia inducida, hongos micorrícicos arbusculares, bacterias promotoras del crecimiento vegetal, *Trichoderma*, compost.

ABSTRACT: Biochar is aromatic carbon rich-C used to improve soil fertility. This product is proposed as an alternative to face the climate change due to its ability to sequester atmospheric carbon. Its physical-chemical characteristics are influenced by the type of biomass and the conditions in which pyrolysis is developed. It has been demonstrated that this material can have high contents of N, P, K, Mg, Mn, Na, Ca, Cu, Zn, Co, Si, Mo, Cr, Ni, and other trace elements. Soil biochar application can induce morphophysiological and metabolic changes in plants and improve their interactions established with soil microorganisms, including mycorrhizal fungi, plant growth promoting bacteria and antagonistic fungi such as *Trichoderma*. Biochar can be enriched or combined with compost, fertilizers and beneficial microorganisms promoting growth and defense of plants against different pests. The interactive effect of biochar with earthworms is soil-specific, because it depends on the quality of the soil in which they come into contact. In addition, biochar is capable of suppressing different soil pests and inducing systemic resistance against foliar pathogens in some plants. The aim of this work was to analyze and summarize aspects related to biochar and plant nutrition, plant growth promotion, biochar and other soil organisms favoring the growth and development of plants, relationship of this product with the decrease/suppression of pests and the defense of plants, as well as some considerations about this product application.

Key words: induced resistance, arbuscular mycorrhizal fungi, plant growth promoting bacteria, *Trichoderma*, compost.

*Autor por correspondencia: Belkis Peteira Delgado-Oramas, e-mail: bpeteira@censa.edu.cu

Recibido: 19/05/2020

Aceptado: 11/07/2020

INTRODUCCIÓN

La transición de la agricultura convencional hacia una agricultura ecológicamente sostenible, capaz de suplir las necesidades alimentarias a una población cada día más creciente y enfrentar el cambio climático, representa un gran reto para los actores sociales vinculados a la producción de alimentos. Entre las transformaciones necesarias para lograr esta transición, se encuentra el uso de productos biológicos que incrementen la productividad de los cultivos y minimicen los daños al medio ambiente y a la salud humana. Diversas alternativas, como son el desarrollo en la obtención y la producción de biofertilizantes, agentes de control biológico, bioplaguicidas, inductores de resistencia en la planta, entre otros, representan temas de investigación y desarrollo a escala internacional.

El biochar se presenta como una opción promisoría, con resultados relevantes en el aumento de la productividad de los cultivos y en la mitigación de los efectos del cambio climático, por su alta capacidad para secuestrar el carbono atmosférico (1). Es un material muy estable, abundante en nutrientes, fundamentalmente carbono que, enriquecido con fertilizantes y/o productos biológicos, puede tener un mejor efecto sobre los cultivos (2).

Se conoce que el biochar influye de forma directa y/o indirecta en el rendimiento de los cultivos. Sus efectos directos son evidentes cuando, una vez aplicado al suelo, produce cambios físico-químicos en este que conducen a mejorar la nutrición de la planta y, por lo tanto, a estimular su crecimiento y desarrollo (3). Por otra parte, la acción indirecta del biochar es propiciar un mejor nicho para la interacción con microorganismos benéficos, así como la inducción de mecanismos defensivos en las plantas, preparándolas ante un posible ataque de plagas (4). En el presente trabajo se resumen los posibles mecanismos mediante los cuales biochar contribuye con la defensa de las plantas.

PARTE ESPECIAL

I. ¿Qué es el biochar?

El biochar es un carbón vegetal que se obtiene a partir de biomasa pirolizada a temperaturas

relativamente elevadas (entre 400 y 750°C) en ambientes carentes de oxígeno (5). Este es un resultado tecnológico creado para recrear las llamadas “Terra Preta de Indio en el Amazonas”, suelos que despertaron interés en investigadores, por ser muy fértiles y tener alta capacidad de almacenamiento de carbono (1). Otra de las características atractivas de “Terra Preta” es su elevada estabilidad. Las investigaciones sugieren que estas tierras fueron creadas por los habitantes del Amazonas en el periodo precolombino, hace más de 2500 años y aún conservan su fertilidad (6).

A pesar de que, en la actualidad, las aplicaciones del biochar abarcan un amplio grupo de campos diferentes en la rama agrícola, estas se han encaminado a mejorar la fertilidad y propiciar la eliminación de contaminantes del suelo, así como al secuestro del carbono para mitigar los efectos del cambio climático (7, 8). Como el biochar puede ser obtenido a partir de una amplia variedad de tipos de biomasa, como son los desechos de la agricultura y de la industria alimenticia, los residuos forestales y los desechos orgánicos, entre otros, este se describe como una alternativa importante para la gestión de los residuos (9). Por otra parte, debido a que durante el proceso de pirólisis se generan productos energéticos gaseosos (sin gas: consistente de H₂, CH₄, CO, CO₂, C₂H₄ y otros hidrocarburos pequeños) y líquidos (bio-aceite), el biochar también puede ser usado para la generación de energía renovable, sin utilizar áreas de producción de alimentos, lo que supone una importante ventaja sobre la tecnología de los biocombustibles (10).

Las características físico-químicas del biochar son determinadas por la biomasa usada como materia prima y, además, por las condiciones de la pirólisis (temperatura, velocidad de calentamiento, presión, tiempo de residencia, así como el agente termoquímico utilizado) (11). La calidad de la biomasa condiciona el tipo y la cantidad de nutrientes presentes en el biochar resultante, por lo que cuando se usan biomásas con mayores cantidades de nutrientes mejor será el biochar. Debido a que la pirólisis se realiza en atmósferas con muy poco o ningún oxígeno, no se produce la combustión del material y, por lo tanto, la pérdida de los nutrientes es mínima (12).

Los biocharres derivados de materiales de orígenes diversos muestran diferentes propiedades del área de superficie, la porosidad y la cantidad de grupos funcionales, que son importantes en relación con el efecto del biochar (13).

II. Biochar y la nutrición vegetal

El biochar puede aportar nutrientes al suelo de forma directa o aumentar la disponibilidad de los nutrientes para la planta, a través del incremento de la capacidad de intercambio catiónico (lo cual favorece la retención de nutrientes y minimiza las pérdidas por lixiviación), cambios en el pH, de las condiciones redox del suelo y su influencia sobre la actividad biológica del suelo (14). El contenido de nutrientes, en los diferentes tipos de biochar, varía según la materia prima utilizada en su producción y las condiciones de la pirólisis aunque, de manera general, todos constituyen una fuente importante de C orgánico (5).

El biochar posee diferentes contenidos de N, P, K en dependencia del tipo de biomasa; se encuentra mayor contenido total de N y P en los obtenidos a partir de materia prima de origen animal que en los de origen vegetal (2). Además, se encontró presencia de Mg, Mn, Na, Ca, Cu, Zn, Co, Si, Mo, Cr y Ni, así como de elementos trazas y metales pesados (15, 16).

Chan y Xu (2) señalaron que los contenidos totales de muchos nutrientes en el biochar no necesariamente son reflejo de su disponibilidad para la planta, y esto es aún más importante para el caso de aquellos nutrientes que se encuentran enlazados orgánicamente como el N y S. Algunos autores plantearon que los altos valores de C/N (un indicador de la capacidad de los sustratos orgánicos para mineralizar y liberar N inorgánico cuando es aplicado al suelo) generalmente hallados en el biochar, sugieren que este puede conducir a la inmovilización de N en el suelo (17). Sin embargo, otros estudios demostraron que esta inmovilización es insignificante o transitoria, debido a que la mayor parte del biochar está constituido por C orgánico biológicamente muy recalcitrante, el cual no es fácilmente mineralizado (2, 18). Asimismo, Angst y Sohi (19) mostraron que la velocidad de la liberación de P, K y Mg dependía de las

asociaciones que establecen estos elementos con el biochar, más lenta en el caso del P que en los casos del K y Mg. El biochar posee grupos funcionales (COOH, OH, ROH, etc.), presentes en su superficie porosa, capaces de interactuar con las moléculas orgánicas y nutrientes como N, P, K, Mg, Ca, S; facilitando la disposición de estos para su absorción por la planta (20). Esto supone la ventaja de que algunos elementos podrían permanecer por más tiempo en el suelo, debido a su liberación lenta y, por lo tanto, ser menos susceptibles a la lixiviación.

Se encontró que la formación de antracoles negros altamente fértiles (Tierras Negras del Amazonas) no se debió a la presencia de biochar puro, sino a la enmienda con mezclas de biochar y materia orgánica rica en nutrientes (21). Algunos ensayos indicaron la sinergia derivada a partir de la combinación del biochar con sustratos orgánicos ricos en nutrientes (22, 23, 24). Schmidt *et al.* (25), a partir de los resultados de 21 ensayos de campo, obtuvieron que la aplicación de bajas dosis en la zona de la raíz de fertilizantes orgánicos, a base de biochar, causó aumentos sustanciales del rendimiento en suelos francos de limo, en comparación con la fertilización orgánica tradicional y la fertilización con NPK o biochar-NPK. La elevada porosidad del biochar, su capacidad para liberar los nutrientes de forma lenta y equilibrada, así como su estabilidad en suelo, podrían ser los motivos de la efectividad y eficiencia en el incremento de los rendimientos hallados durante la combinación de biochar y compost.

Más recientemente, Hagemann *et al.* (26) identificaron la formación de un recubrimiento orgánico complejo y abundante en nutrientes en el biochar combinado con compost, que cubre las superficies externas e internas de las partículas del biochar. Este recubrimiento agrega hidrofiliabilidad, restos redox activos y mesoporosidad adicional, lo que fortalece la interacción biochar-agua y así incrementa la retención de nutrientes, lo que explicaría la eficiencia del biochar combinado con compost.

III. El biochar y la promoción del crecimiento vegetal

Tras la aplicación de biochar al suelo, sucede un grupo de cambios en la planta que van desde

los cambios morfofisiológicos y metabólicos, hasta cambios en las interacciones que se establecen con los microorganismos del suelo. La incorporación de biochar puede alterar el crecimiento y las características de la raíz y, por lo tanto, afectar favorablemente el crecimiento de la planta. Olmo *et al.* (27) encontraron que la adición de un biochar de pirólisis lenta a un vertisol sembrado con *Triticum durum* L., produjo cambios favorables que conllevaron al aumento en la proliferación de raíces finas (incrementando la longitud específica y reduciendo la densidad del tejido radicular) y promovieron el desarrollo del cultivo. El desarrollo de estas raíces finas puede favorecer la adquisición de recursos por el incremento de la interacción de las raíces con el biochar, la exploración del suelo y la eficacia de los fertilizantes (28).

Xiang *et al.* (29) realizaron un metaanálisis a partir de los resultados de 136 artículos científicos, donde evaluaron las respuestas de las características de la raíz, asociadas con 13 variables bajo condiciones de aplicación de biochar. En su estudio obtuvieron que la aplicación de biochar aumentó la biomasa (+32 %), el volumen (+29 %), el área de superficie (+39 %), la longitud (+52 %), el número de puntas (+17 %) y el diámetro de la raíz (+9,9 %). Sus resultados sugirieron que la presencia de biochar beneficia el desarrollo morfológico de la raíz para aliviar deficiencia de nutrientes y agua de la planta, en lugar de maximizar la acumulación de biomasa. En otro orden de resultados, encontraron que la aplicación de biochar no afecta la concentración de N en la raíz, pero aumenta, significativamente, la concentración de P en este órgano. La aplicación de biochar también afectó a los microorganismos asociados a la raíz y aumentó, significativamente, el número de nódulos. Aunque existen evidencias de que el incremento de la nodulación por el biochar depende, sobre todo, de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo (30, 31). La respuesta de características de la raíz a la aplicación de biochar, por lo general, fueron mayores en las plantas anuales que en las plantas perennes y se vieron afectadas por la textura del suelo y los valores de pH (29).

Por su parte, Sun *et al.* (32) demostraron que la tasa de aplicación de biochar tiene una fuerte influencia sobre los cambios morfológicos, fisiológicos y metabólicos en maíz (*Zea mays* L.). La aplicación de biochar a tasas desde 1 % hasta 5 % condujo a cambios fisiológicos y metabólicos en maíz, como son los aumentos en el contenido de clorofila y en la tasa neta de fotosíntesis, lo que produjo incrementos en los rendimientos del grano y la paja; mientras que, la dosis de aplicación de 5 % provocó una amplia gama de respuestas metabólicas, que incluyeron cambios en el perfil metabolómico y en el metabolismo de los azúcares y los aminoácidos y estimuló el crecimiento de las plántulas de maíz. Dosis superiores de hasta 30 % inhibieron el desarrollo radicular, lo que se manifestó mediante cambios en la elongación, grosor, ramificación lateral y viabilidad de las células de las raíces (32). A pesar de lo sugerido por estos autores, debe tenerse en cuenta que estas dosis poseen escasa aplicación práctica en campo, debido a que equivalen a la incorporación de altas cantidades de producto por hectárea.

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) y los hongos micorrízicos (HMA) son los dos principales grupos de microorganismos que establecen relaciones simbióticas con las plantas. La relación que se establece entre ellos puede llegar a ser esencial para algunos cultivos como *Phaseolus vulgaris* L., cuya simbiosis con bacterias del género *Rhizobium* facilita la fijación de nitrógeno y reduce la necesidad de aplicación de fertilizantes químicos (33). Por otro lado, las micorrizas están presentes en casi todos los grupos de plantas terrestres, mejoran la absorción de agua y nutrientes de la raíz, y les permite colonizar suelos más pobres (34).

El uso de los biofertilizantes, para estimular el crecimiento y desarrollo vegetal, está incluido entre las alternativas implementadas en el manejo de los cultivos para minimizar la aplicación de fertilizantes químicos y, consecuentemente, reducir el impacto sobre la salud humana y el medio ambiente. Un grupo de estudios recientes demuestra que los efectos positivos del uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos micorrízicos en la promoción del crecimiento vegetal, el incremento de los

rendimientos y en el enfrentamiento a diferentes tipos de estrés abiótico como la salinidad, la sequía y la contaminación de suelos con metales tóxicos, son más potentes cuando se integran con biochar (35, 36, 37, 38). Se informaron resultados de ese tipo en varios cultivos, algunos de ellos con gran importancia para la seguridad alimentaria mundial, como son *Glycine max* L., *Cicer arietinum* L., *Oryza sativa* L., *Solanum tuberosum* L., *P. vulgaris* L., *Solanum lycopersicum* L., *Rosmarinus officinalis* L., *Theobroma cacao* L., *Z. mays* y *Triticum aestivum* L. (36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45).

Un ejemplo de estos efectos interactivos de las rizobacterias y el biochar sobre el crecimiento se observó en *P. vulgaris* (40). En ese estudio, el uso combinado de biochar con *Bacillus* sp. estimuló positivamente el crecimiento de las plantas e incrementó el contenido de N y P en los tallos. Por su parte, Akhtar *et al.* (35) encontraron que la aplicación combinada de biochar con *Burkholderia phytofirmans* (PsJN) y *Enterobacter* sp. (FD17) disminuyó la concentración de Na⁺ en el xilema y contribuyó al mantenimiento del balance de los nutrientes, permitiendo mitigar, significativamente, el estrés por salinidad en el maíz. Hashem *et al.* (37) hallaron que el efecto integrado de HMA con biochar puede contribuir con la tolerancia a la sequía del garbanzo (*C. arietinum*), debido a que, bajo esas condiciones, estimuló el crecimiento y otros atributos fisiológicos por el aumento de la captación de N y P, la síntesis de clorofila y la fotosíntesis. También se informaron resultados sobre el mejoramiento en el crecimiento del maíz y la reducción de la acumulación de Cd/Pb, debido al efecto sinérgico entre HMA (*Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd) C. Walker & A. Schüßler, *Glomus versiforme* (P. Karst.) S.M. Berch y *Rhizophagus intraradices* (N.C. Shenk & G.S. Sm.) (C. Walker & A. Schüßler) y biochar, de los cuales el efecto más pronunciado fue entre *G. versiforme* y biochar (44).

Kasmaei *et al.* (42) observaron que, al enmendar un suelo calcáreo con biochar de *Azolla* y *Pseudomonas fluorescens*, se produjo una mejora significativa del crecimiento del romero (*R. officinalis*) debido a las condiciones

nutricionales, al incremento de la biomasa y la actividad microbiana en el suelo calcáreo. Estos cambios en la comunidad microbiana podrían explicar los efectos positivos observados durante las interacciones del biochar con los biofertilizantes.

Ajema (46) señaló diversos posibles mecanismos, directos e indirectos, mediante los cuales el biochar puede influir sobre los microorganismos del suelo; entre ellos sugirió que:

- Debido a su porosidad y área de superficie específica, el biochar es capaz de dar abrigo a los microorganismos del suelo. A pesar de que este es un criterio muy generalizado, debe considerarse que la mayoría de los poros del biochar son inferiores al diámetro de las células, por lo que la colonización de los microorganismos ocurre, comúnmente, en los macroporos o en las partes externas del biochar, debido a que los microporos o mesoporos no les son accesibles.
- Las partículas de biochar poseen nutrientes e iones adsorbidos sobre su superficie (lo que ocurre principalmente en el interior de los microporos y mesoporos y menos en la superficie externa), nutren a los microorganismos del suelo y estimulan su crecimiento.
- El biochar modifica el hábitat microbiano por la mejoría de las propiedades del suelo que son esenciales para el crecimiento de los microorganismos (lo que incluye las condiciones de aeración, contenido de agua, potencial redox y el pH).
- Induce cambios en las actividades enzimáticas que están involucradas en los ciclos elementales relacionados con los microorganismos en el suelo.
- Es capaz de interrumpir la comunicación intra e inter-específica entre las células microbianas, debido a que puede absorber o hidrolizar las moléculas señalizadoras. Incluso, el biochar también podría contener algunas moléculas que funcionen como señales en la comunicación microbiana;
- El biochar aumenta la absorción y degradación de los contaminantes del suelo y reduce su

biodisponibilidad y toxicidad a los microorganismos.

Es importante mencionar que el biochar puede participar en el intercambio directo de electrones interespecie (DIET, por sus siglas en inglés) actuando como baterías o conductores que pueden aceptar, almacenar y mediar los electrones desde y para las reacciones bioquímicas entre los microorganismos (47). La conductividad eléctrica del biochar se basa en el salto discontinuo de electrones. Esto es muy importante para sus funciones como mediador o lanzadera de electrones (microbiano), lo que facilita la transferencia de electrones interespecie. Además, la presencia de partículas de gran tamaño del biochar permite conducir a un relativo intercambio electrónico de larga distancia. Esta característica le concede al biochar una accesibilidad espacial más extensa a los aceptores de electrones alternativos (48). Como aditivo en la alimentación animal, se ha visto que el biochar participa como mediador en la transferencia de electrones entre los microorganismos, así como mediador electrónico que actúa sinérgicamente para incrementar la eficiencia de otros mediadores (47). De manera similar a como sucede en la digestión animal, este fenómeno podría ocurrir entre los microorganismos de suelo que pueden verse beneficiados en presencia de biochar.

A pesar de los efectos positivos derivados de la acción conjunta de biofertilizantes y biochar planteados con anterioridad, Vejvodová *et al.* (49) observaron que la inoculación con *F. mosseae* no potenció los cambios inducidos por el biochar obtenido a partir de residuos secos de olivo, en la movilidad de elementos trazas en suelos contaminados. Qiao *et al.* (50) sugirieron que entre los HMA y el biochar se establecía una débil interacción, luego de haber encontrado que la inoculación con hongos micorrízicos tenía un efecto insignificante sobre la movilidad de elementos trazas, tanto en suelos tratados como no tratados con biochar. Sin embargo, Moller (45) encontró que la acción integrada de biochar y HMA permitió el crecimiento del maíz, probablemente como resultado de los elevados niveles de K en los tejidos vegetales suplidos por biochar y al incremento en la colonización

micorrízica. Además, Hammer *et al.* (51) encontraron que las hifas del hongo micorrízico arbuscular *Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker & Buscot) (C. Walker & A. Schüßler) accedían a micrositos dentro del biochar, difíciles para la entrada de las raíces de la planta (<10 mm), lo que le permitió mediar en la captura de P desde el biochar.

IV. Biochar y otros organismos de suelo que favorecen el crecimiento y desarrollo de las plantas

La enmienda del suelo con biochar también puede afectar a las lombrices de tierra, las cuales son una parte esencial de la fauna en la mayoría de los suelos y funcionan como un indicador de la salud de estos (52). Las lombrices de tierra se asocian con altas concentraciones amonio-N y nitrato-N, bajo pH, alta proporción de hongos, bacterias, alta abundancia de Collembola y alta biomasa de trébol blanco (*Trifolium repens* L.) en los mesocosmos (53). Liesch *et al.* (54) encontraron que altas tasas de aplicación de biochar, procedentes de desechos de aves de corral, con valores de pH muy elevados, podían incrementar la mortalidad y la pérdida de peso de la lombriz de tierra *Eisenia foetida* Savigny. De igual manera, Gomez-Eyles *et al.* (55) observaron que la significativa pérdida de peso en *E. foetida* provocada por biochar podía asociarse a la capacidad de este de albergar a las bacterias y hongos en sus microporos, lo que limita el acceso de depredadores mayores y de adsorber compuestos orgánicos sobre su superficie, factores que disminuyen la disponibilidad de alimentos para la lombriz. Sin embargo, Li *et al.* (56) encontraron que, a pesar de que el biochar pudo ocasionar disminución del peso de *E. foetida*, no afectó su capacidad reproductiva y que la aplicación de biochar humedecido, previamente o inmediatamente después de su aplicación al suelo, podría evitar la desecación de los invertebrados y, por lo tanto, los efectos negativos del biochar sobre *E. foetida*, permitiendo los servicios benéficos del mismo a los ecosistemas.

Aunque los trabajos anteriores reflejan los posibles efectos negativos del biochar sobre las lombrices de tierra, estos solo reflejan la

necesidad de la utilización de un biochar de calidad. Los estándares de la Iniciativa Internacional de Biochar (IBI standards) y el Certificado Europeo de Biochar (EBC, por sus siglas en inglés, a la que se volverá a referir posteriormente en el trabajo, exigen pruebas de evasión o migración de lombrices donde se excluyen el biochar que exhiba resultados negativos sobre las lombrices (57, 58).

Varios trabajos se refieren a que el efecto interactivo de biochar con las lombrices de tierra es de tipo suelo-específica debido a que depende, en gran medida, de la calidad del suelo en el que se pongan en contacto (53, 59). Garbuz *et al.* (53) observaron que el biochar de sauce (*Salix matsudana* L.) y *Aporrectodea caliginosa* Savigny incrementó el crecimiento de trébol en suelo tipo Cambisol; mientras que, el efecto sinérgico positivo sobre los procesos bioquímicos del suelo y el crecimiento de trébol, fue más evidente en Andosol.

Noguera *et al.* (59) notaron que los efectos del biochar de leña de *Eucalyptus deglupta* Blume y *Pontoscolex corethrurus* Muller sobre el crecimiento de *O. sativa* variaron en tres tipos de suelo diferentes (suelo rico en nutrientes, suelo pobre en nutrientes, suelo pobre en nutrientes suplementado con fertilización). En suelos ricos, los efectos del biochar y la lombriz de tierra, sobre el aumento de la biomasa del arroz, fueron claros y aditivos; en suelos pobres solo *P. corethrurus* mostró efectos mientras que, en suelos pobres fertilizados, ninguno de los dos mostró efectos evidentes. Estos autores se refirieron a los efectos de la lombriz de tierra y el biochar sobre diferentes características de las plantas y al contenido de nitrógeno mineral del suelo y confirmaron que actúan a través de un incremento en la disponibilidad de nutrientes (la lombriz de tierra mineraliza los nutrientes; mientras que el biochar aumenta su retención). Por esta razón, se recomienda el uso de biochar compostado o fermentado en lugar de biochar fresco.

V. Biochar y su relación con la disminución / supresión de plagas y la defensa de las plantas

Es un hecho que el biochar produce cambios en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que se traduce en la

modificación de las interacciones entre los distintos organismos que lo habitan, conduciendo a múltiples beneficios para la salud de la planta. Con anterioridad, se expuso cómo el biochar propicia que las relaciones entre las plantas y los microorganismos benéficos, como HMA y BPCV, sean más estrechas. Esto, generalmente, propicia la estimulación del crecimiento y desarrollo de la planta, lo que también puede acelerar la expresión de las defensas constitutivas y/o mejorar las respuestas inducidas. Además, el biochar puede tener otros efectos beneficiosos para las plantas, a través de una acción directa sobre las plagas o a través de la inducción de resistencia en estas.

a) Efecto directo del biochar sobre la disminución de las plagas

Se observó que, debido a su capacidad adsorptiva, el biochar por sí solo puede limitar la exposición de la planta a compuestos inhibitorios como los ácidos láctico, oxálico, succínico y fenilacético y a las enzimas secretadas por los patógenos durante el proceso infectivo, las cuales les permiten atravesar la pared celular de las células vegetales (10).

Durante la pirólisis se pueden producir sustancias como el benceno y el etileno, que le atribuyen propiedades antimicrobianas al biochar (60). También se encontraron compuestos como metoxifenoles y fenoles, resultados de la pirólisis de las hemicelulosas y la lignina los cuales, junto a los ácidos carboxílicos, cetonas y furanos, actúan como inhibidores microbianos y nematicidas, lo que pudiera provocar el efecto supresor del biochar (60). Además, los compuestos químicos presentes en los residuos de alquitrán, que son adicionados al suelo con el biochar, pueden tener efectos tóxicos directos sobre los patógenos de suelo (4).

Por otra parte, Rogovska *et al.* (61) sugirieron que la capacidad para suprimir significativamente la severidad de la podredumbre de la raíz en soya causada por *Fusarium virguliforme* O'Donnell & T. Aoki, mostrada por biochar de rastrojos de maíz (pirolizado a 500 y 600°C, respectivamente), pudo deberse a los cambios en la comunidad microbiana inducida por los biochares. Otros resultados revelaron que el

biochar, derivado de troncos de madera (4 %), fue capaz de suprimir las poblaciones del nematodo fitoparásito *Pratylenchus coffeae* (Zimmermann) Filip. & Schu. Stek. en café (*Coffea* spp.), debido a la acción de compuestos tóxicos liberados del biochar (62). Cao *et al.* (63) mostraron el potencial del biochar, obtenido a partir de racimos de frutos vacíos de *Elaeis guineensis* Jacq. para suprimir la infestación de nematodos fitoparásitos, debido a que este incrementó las poblaciones de nematodos bacterívoros y fungívoros, que limitan el desarrollo de los fitoparásitos.

b) Efecto indirecto sobre la disminución/supresión de plagas a partir de la inducción de resistencia en las plantas

La resistencia inducida es una forma de defensa activa que involucra la expresión diferencial de genes y cambios metabólicos que ocurren como consecuencia de un proceso de reconocimiento específico entre la planta y la plaga (64). Se conocen dos formas de resistencia inducida: la resistencia sistémica adquirida y la resistencia sistémica inducida, las cuales pueden ser diferenciadas por la vía reguladora y la naturaleza de los inductores (elicitors) que participan (4).

La resistencia sistémica adquirida (SAR) se manifiesta cuando la planta es atacada por un patógeno incompatible que induce reacciones de hipersensibilidad en los sitios de entrada del patógeno, produciendo una resistencia local (LAR) en el tejido infectado. Una serie de señales, principalmente mediadas por el ácido salicílico, inducen resistencia en el resto de la planta e involucran la producción de proteínas relacionadas con la patogénesis (proteínas PR) (64). En cambio, la resistencia sistémica inducida (ISR) se desarrolla a partir de la colonización de las raíces de la planta por microorganismos de la rizosfera (rizobacterias y hongos) y se caracteriza por estar mediada por vías metabólicas sensibles al ácido jasmónico y al etileno, y ser independiente de la expresión de los genes PR y del ácido salicílico (65).

Se conoce que, tanto los inductores químicos como los biológicos (microorganismos virulentos, avirulentos y no patogénicos) pueden disparar la SAR y, además, algunos

microorganismos (por ejemplo, *Trichoderma* spp.) pueden liberar compuestos capaces de elicitar tanto SAR como ISR (66, 67). Además de los elicitors químicos y biológicos, estreses abióticos como las temperaturas extremas, la humedad, diversas sustancias químicas y la luz ultravioleta pueden causar daños físicos en los tejidos, lo que propicia la activación de la reacción de defensa de forma no específica (64).

Aún es escasa la información existente sobre los mecanismos mediante los cuales el biochar protege a la planta del ataque de las plagas. Dada la muy conocida capacidad del biochar de adsorber moléculas orgánicas de pequeño y gran tamaño, debido a la presencia de grupos funcionales sobre su elevada área superficial, es esperado que el biochar adsorba también varias sustancias químicas presentes en los exudados de la raíz, cambiando la química de la rizosfera y alterando la estructura de la comunidad, lo que haría a la rizosfera menos favorable para el desarrollo de microorganismos patógenos (10).

Akhter *et al.* (68) encontraron que el biochar obtenido a partir de desechos de jardín, combinado con compost, fue capaz de suprimir a *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Snyder & Hansen, debido que produjo cambios en la composición de los exudados de la raíz de las plantas de tomate, lo que causó una reducción significativa del crecimiento micelial. Estos metabolitos secundarios son exudados desde las raíces de las plantas, con el objetivo de iniciar la simbiosis con los microorganismos, adquirir nutrientes y disuadir a patógenos o competidores (69).

Por otra parte, en la composición de los biochar existen residuos de alquitrán formados por una mezcla compleja de compuestos orgánicos de diferentes tipos, que están presentes en bajas concentraciones, entre los que se incluyen los siguientes: ácidos n-alcanoicos de cadena media y larga, hidroxí- y acetoxi-ácidos, ácidos benzoicos, dioles y tioles de cadena corta y media, fenoles y polifenoles, aminas, amidas e hidrocarburos alifáticos (4). Graber *et al.* (70) sugirieron que estos compuestos podrían inducir los mecanismos de resistencia en la planta sembrada en suelos enmendados con biochar, en respuesta a estos niveles bajos de compuestos fitotóxicos en la zona de las raíces. También se informó que el biochar tiene la capacidad de

potenciar la inducción de resistencia mediante las vías de defensas con el ácido salicílico y el ácido jasmónico/etileno, propiciando la activación de las enzimas antioxidantes de la planta y la expresión de genes ante la infección por patógenos fúngicos foliares (71).

En 2012, Meller Harel *et al.* (71) observaron un estado de preparación de la expresión de genes relacionados con la defensa (*FaPR1*, *Faolp2*, *Fra a3*, *Falox* y *FaWRKY1*) en hojas de fresas por la infección con *Botrytis cinerea* Pers. y *Podosphaera aphanis* (Wallroth) Braun & Takamatsu. Un año después, Haile *et al.* (72) informaron que el biochar obtenido de los desechos de invernadero y pirolizado a 450°C indujo resistencia a *B. cinerea* en mutantes de tomate insensibles a etileno (*Never ripe*), y en una línea transgénica que no acumula ácido salicílico (NahG), pero no en un mutante deficiente de ácido jasmónico (*def1*). Estos autores encontraron que, la adición de biochar al suelo indujo la expresión de los genes *PI2*, *TomLoxA*, *TomLoxC*, *TomLoxD*, *Pti4*, *Pti5*, *GluB*, *CHI9*, *SAMT*, *ACOL1* y *PR1a* en, al menos, uno de los genotipos, los cuales, cuando fueron enfrentados a *B. cinerea*, incrementaron los niveles de transcripción de los genes mencionados con la excepción de *TomLoxA* y *TomLoxC*. La expresión de estos genes en los mutantes *def1* no se afectó con la presencia de biochar, lo que sugirió que la vía de señalización del ácido jasmónico tiene una función importante en la resistencia mediada por biochar en el patosistema *B. cinerea* - tomate (72).

Viger *et al.* (73) hallaron que los efectos positivos en el crecimiento de *Arabidopsis thaliana* L. y de *Lactuca sativa* L. estuvieron acompañados por la regulación negativa de un grupo de genes de defensa fundamentales para la protección de la planta contra varios tipos de estreses abióticos y bióticos (incluyendo la vía de biosíntesis de ácido jasmónico, defensinas y metabolitos secundarios como glucosinolatos, antocianinas y flavonoides). El uso de cultivares susceptibles podría ser una de las causas de la regulación negativa de los genes relacionados con la defensa, hecho que no pudo ser constatado debido a que en este estudio las plantas no fueron enfrentadas a algún patógeno. Por su parte, Mehari *et al.* (74) hallaron que exposición de las

plantas de tomate a suelos enmendados con biochar indujo la preparación de respuestas de defensa tempranas y tardías, particularmente en los genes *Pti5* (relacionado con el etileno) y *Pi2* (relacionado con el ácido jasmónico). Además, en todos los genotipos se produjo una intensa y temprana acumulación de H₂O₂, subsecuente a la inoculación con *B. cinerea*, como resultado de la aplicación de biochar, con la excepción de los mutantes *def1*.

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios de las plantas que tienen importantes funciones en la resistencia (75). Khalifa (76) planteó que biochar fue capaz de incrementar significativamente la concentración de compuestos fenólicos totales y la actividad de las enzimas peroxidasas en las hojas de tomate, luego de la aplicación de biochar a 2,5 % y 5 %; ambos parámetros fueron superiores a medida que se aumentó la concentración de biochar en el suelo, tanto en plantas inoculadas como infectadas con TMV cuando se compararon con el control sin biochar.

c) Otras aplicaciones del biochar relacionadas con el Manejo Integrado de Plagas (MIP)

La producción de antibióticos, la competencia por espacio y nutrientes u otro mecanismo de actividad antagónica por parte de los microorganismos benéficos, representan una protección directa de la planta contra los patógenos de suelo (4). Se observó que para aumentar la eficacia del biochar sobre el suelo, este debe ser activado o recargado, debido a que se considera un catalizador por su capacidad de aumentar y mejorar el consumo de los nutrientes y la absorción del agua en las plantas y los microorganismos del suelo (77).

El biochar puede ser usado como transportador de inoculantes bacterianos y fúngicos, con el objetivo de potenciar los efectos de estos microorganismos mediante su inmovilización y aumento de su sobrevivencia en el suelo (78). La combinación de biochar con agentes de control biológico resulta de especial importancia para la defensa de las plantas contra las plagas. Entre los agentes de control biológico con efectos antagónicos de más amplio espectro se encuentra *Trichoderma* spp. Los hongos de este género son

conocidos por su elevada capacidad reproductiva, plasticidad ecológica y por actuar a través de mecanismos directos e indirectos que proporcionan a la planta mejor adaptabilidad en el medio y resistencia a diferentes patógenos (79, 80). Existe muy poca información al respecto del uso de biochar con agentes de control biológico microbianos. No obstante, algunos estudios mostraron que la aplicación de biochar puede incrementar la abundancia de *Trichoderma* spp. en la rizosfera de *Capsicum annuum* L. y *Secale cereale* (L.) M. Bieb. (81, 82).

Muter *et al.* (83) hallaron que la adición de biochar con *Trichoderma viride* Pers. ex Fr. inmovilizado al suelo, incrementó significativamente la germinación de las semillas y el crecimiento del maíz. Algunos trabajos demostraron el potencial antagonista de *Trichoderma harzianum* Rifai en combinación con biochar contra cinco basidiomicetos de madera descompuesta y en la reducción del efecto deletéreo causado por *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Gold. sobre frijol (84). Block *et al.* (85) informaron que el biochar no influyó en el establecimiento de *Trichoderma*. Sin embargo, otros autores informaron que la aplicación del biochar mejoró, considerablemente, la sobrevivencia de *Trichoderma* en el suelo por períodos de varias semanas (82).

Resultados muy recientes revelaron que el biochar de fuentes orgánicas de *Prunus persica* L. y *Trichoderma* redujeron drásticamente la frecuencia de aparición y las biomazas de un amplio grupo de malezas (*Euphorbia heterophylla* L., *Phyllanthus fraternus* L., *Portulaca oleracea* L., *Parthenium hysterophorus* L., *Ipomoea nil* L., *Erigeron canadensis* L., *Echinochloa crusgalli* L., *Asparagus officinalis* L., *Cynodon dactylon* L., *Digera muricata* L., *Cyprus rotundus* L. y *Solanum nigrum* L.), que se encontraron asociadas a la soya durante su ciclo de cultivo (86).

VI. Algunas consideraciones sobre la aplicación del biochar.

Aun cuando los efectos positivos del biochar se hicieron evidenciaron en los epígrafes

anteriores, aspectos como la composición y las dosis de aplicación deben ser estudiados cuidadosamente.

Phoungthong *et al.* (87) encontraron diferentes contenidos de metales pesados en biochar obtenidos a partir de lodos de aguas residuales sometidos a diferentes temperaturas de pirólisis. Estos autores demostraron que, a temperaturas de pirólisis más altas, se incrementó el contenido de metales pesados por la descomposición de la materia orgánica en el lodo y el reparto de los metales pesados con baja volatilidad en la matriz del biochar. A pesar de que todos los biochar tenían un límite aceptable de metales pesados para la aplicación en suelos, se observó que los biochar que contenían mayor cantidad de estos inhibían la germinación de las semillas de *T. aestivum*; mientras que, los que tenían menor cantidad, la promovían. Por ser materiales obtenidos mediante pirólisis de la biomasa, los biochar pueden contener concentraciones considerables de hidrocarburos aromáticos policíclicos contaminantes con efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos (88).

Para evitar los problemas mencionados con anterioridad, es necesario controlar la calidad del biochar en cuanto al contenido de metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos; lo que ratifica la importancia de los mecanismos de control de calidad basados en las últimas investigaciones y prácticas. En este sentido, Europa cuenta con el EBC cuyo objetivo es permitir y garantizar la producción sostenible de biochar (58).

Frenkel *et al.* (89) realizaron un análisis del efecto de las dosis de aplicación de biochar sobre la supresión de las enfermedades vegetales. Este análisis reveló que, a pesar de que el biochar principalmente tiene efectos positivos o neutros sobre el crecimiento vegetal, cuando se aplica en concentraciones superiores a 25 % (v: v), frecuentemente para la supresión de las enfermedades es más efectivo a concentraciones inferiores a ≤ 1 %. Por su parte, concentraciones superiores a 3 % fueron inefectivas o empeoraron la salud de la planta en su mayoría. La severidad de la enfermedad, en ocasiones, exhibe una curva de respuesta en forma de U, con un mínimo a dosis intermedias de biochar (90). Antes, en este

trabajo, se menciona que las dosis de aplicación deben ser estudiadas con detenimiento, las altas dosis pueden tener una relación costo/beneficio negativa, pues su aplicación equivale a usar volúmenes grandes de biochar, lo que tendría repercusión en los costos para el agricultor y efectos (a determinar) sobre el suelo y sus componentes físico, químico y biológico.

Luo *et al.* (91) hallaron que las dosis de aplicación de biochar pueden influir sobre la abundancia bacteriana y la estructura de la comunidad. Luego de exponer a las plantas de *S. cereale* y *Lilium candidum* L. a diferentes concentraciones de biochar de madera de *Malus pumila* Mill. (1 %, 3 %, 5 %, 7 %, y 9 % por peso, 0 % como un control) durante 188 días, encontraron cambios en las estructuras de la comunidad bacteriana en los tratamientos con biochar comparados con los que carecían de este. La abundancia bacteriana óptima del suelo se alcanzó con una dosis de 7 % de biochar, pero los valores más bajos se encontraron en los controles (0 %). El análisis taxonómico identificó que las familias dominantes en el suelo donde creció *S. cereale*, fueron *Micrococcaceae* (24,53 %), *Oxalobacteraceae* (11,87 %), y *Nocardioideae* (7,89 %) mientras que, *Micrococcaceae* (16,20 %), *Xanthomonadaceae* (6,94 %), y *Nocardioideae* (6,41 %) fueron las familias dominantes en los suelos donde se desarrolló *L. candidum*. Estos resultados mostraron que las dosis de aplicación influyen sobre las propiedades químicas del suelo y producen alteraciones sobre la abundancia y la comunidad bacterianas presentes en este.

En Cuba, la información sobre la producción y el uso del biochar resulta aún escasa si se compara con el desarrollo alcanzado por la temática a nivel internacional (92, 93, 94, 95); sin embargo, se han obtenido en el país resultados promisorios en cuanto al uso de biochar enriquecido con sustratos orgánicos cargados con nutrientes (95). Un proyecto en desarrollo que involucra a investigadores y especialistas de más de una decena de instituciones nacionales y a Ithaka Institute for Carbon Strategies (Suiza), aborda el desarrollo de la tecnología de obtención de biochar en el país y los estudios relacionados con su uso en la alimentación y bienestar animal; así como su empleo, junto a agentes de control

biológico y aceites esenciales, en la promoción de defensa en las plantas y la regulación de plagas. Este artículo es un acercamiento a los impactos (beneficiosos o no) del uso del biochar como enmienda de suelo, como una base teórica para el estudio de las potencialidades de su uso en las condiciones de Cuba en la producción agrícola, combinándolo con materiales orgánicos, organismos benéficos y aceites esenciales.

Los estudios para determinar cómo el biochar contribuye a la defensa de las plantas son complejos, debido a las diversas características particulares de estos materiales (biomasa, condiciones de pirólisis, otros) y las complejas interacciones de las plantas con su entorno; abordar esta temática en Cuba requiere de investigaciones que involucrarán a especialistas que estudien las características y calidad de los biochares obtenidos en el país; la existencia de colecciones de poblaciones de organismos plaga, agentes de control biológico, BPCV y HMA bien estudiados y caracterizados, así como a especialistas en los estudios de las interacciones hospedante-patógeno, que investiguen en los procesos de inducción de resistencia en las plantas por la adición de biochar acompañado de bioinductores (agentes de control biológico, BPCV, HMA y aceites esenciales), entre otros, para poder ofrecer resultados de aplicación práctica y que el biochar, además de por sus bondades en la mejora de los suelos y nutrición de las plantas, sea considerado también como un elemento con potencial beneficioso dentro de las estrategias de manejo de plagas que afectan cultivos estratégicos para la seguridad alimentaria y nutricional de la población en Cuba.

AGRADECIMIENTOS

Los autores utilizaron recursos y tiempo en el marco del proyecto “Re-cycling of biomass nutrients and carbon for advanced organic fertilization in an ecosmart and climate positive agriculture on Cuba (Bio-C)”, financiado por Schweizerischer National Fonds y el Fondo Nacional de Ciencia (FONCI) de Cuba. Los autores agradecen a Susana Gorrita-Ramírez por contribuir con la búsqueda de información para la redacción de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Bezerra J, Turnhout E, Melo Vasquez I, Francischinelli Rittl T, Arts B, Kuyper TW. The promises of the Amazonian soil: shifts in discourses of Terra Preta and biochar. *Journal of Environmental Policy & Planning*. 2016. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2016.1269644>.
2. Chan KY, Xu Z. Biochar nutrient properties and their enhancement. En *Biochar for Environmental Management-Science and Technology*. Editores: Lehmann J, Joseph S. 2009; pp 68-84.
3. Kammann C, Graber ER. En Lehmann J, Joseph S. (Eds.), *Biochar management Science, Technology and Implementation*. Routledge, New York. 2015, pp 391-419.
4. Elad Y, Cytryn E, Meller Harel YM, Lew B, Graber ER. The Biochar Effect: plant resistance to biotic stresses. *Phytopathol. Mediterr*. 2011; 50: 335-349.
5. Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: an introduction. En: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan. 2009, pp. 1-12.
6. Neves E, Petersen JB, Bartone RN, Silva CA. Historical and socio-cultural origins of Amazonian dark earths. En J. Lehmann, D. Kern, B. Glaser, & W. Woods (Eds.), *Amazonian dark earths: Origin, properties, management* Boston, MA: Kluwer Academic Publishers. 2003, pp. 29-50.
7. Schmidt HP. 55 uses of Biochar. *Ithaka Journal*. 2012; 1: 286-289.
8. Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. Biochar effects on soil biota: a review. *Soil Biology & Biochemistry*. 2011; 43: 1812-1836.
9. Amin FR, Huang Y, He Y, Zhang R, Liu G, Chen C. Biochar applications and modern techniques for characterization. *Clean Techn Environ Policy*. 2016. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1218-8>
10. Graber ER y Elad Y. Biochar impact on plant resistance to disease. In *Biochar and soil biota*. Editado por Ladygina N and Rineau F. CRC Press. 2013, pp 41-68.
11. Lee J, Yang X, Cho SH, Kim JK, Lee SS, Tsang DCW, Ok YS, Kwon EE. Pyrolysis process of agricultural waste using CO₂ for waste management, energy recovery, and biochar fabrication. *Applied Energy*. 2017; 185: 214-222.
12. Maraseni TN. Biochar: maximising the benefits. *International Journal of Environmental Studies*. 2010; 67(3): 319-327. <https://doi.org/10.1080/00207231003612225>
13. Tang J, Zhu W, Kookana R, Katayama A. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2013; 116(6): 653-659.
14. Olmo-Prieto M. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. [Tesis en opción al grado de Doctor]. Universidad de Córdoba. 2016.
15. Muhammad N, Brookes PC, Wu J. Addition impact of biochar from different feed stocks on microbial community and available concentrations of elements in a Psammaquent and a Plinthudult. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016; 16(1): 137-153.
16. Aragão de Figueredo N, da Costa LM, Car L. Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. *Revista Ciência Agronômica*. 2017; 48(3): 395-403.
17. Sullivan DM, Miller RO. *Compost Quality Attributes, Measurements and Variability*, CRC Press. 2001.
18. Bruun EW, Ambus P, Egsgaard H, Hauggaard-Nielsen H. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biology & Biochemistry* . 2012; 46: 73-79.
19. Angst T, Sohi SP. Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy*. 2013; 5: 221-226. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12023>
20. Patel AK. Land Applications of Biochar: An Emerging Area. En: *Waste to Wealth. Energy, Environment, and Sustainability*. Editores: Singhanian RR, Agarwal R, Kumar R, Sukumran R. Springer. 2018, pp: 172-197. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7431-8_9.

21. Solomon D, Lehmann J, Fraser JA, Leach M, Amanor K, Frausin V, *et al.* Indigenous African soil enrichment as a climate-smart sustainable agriculture alternative. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2016; 14: 71-76. <https://doi.org/10.1002/fee.1226>.
22. Ghosh S, Ow LF, Wilson B. Influence of biochar and compost on soil properties and tree growth in a tropical urban environment. *International J of Environmental Science and Technology*. 2015; 12: 1303-1310. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0508-0>.
23. Kammann CI, Glaser B, Schmidt HP. Combining biochar and organic amendments. En: *Biochar in European soils and agriculture: science and practice*, Shackley S, Ruysschaert G, Zwart K, Glaser B (eds). Routledge: London. 2016, 136-164.
24. Vandecasteele B, Sinicco T, D'Hose T, Vanden Nest T, Mondini C. Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake. *Journal of Environmental Management*. 2016; 168: 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.045>.
25. Schmidt HP, Pandit BH, Cornelissen G, Kammann CI. Biochar-based fertilization with liquid nutrient enrichment: 21 field trials covering 13 crop species in Nepal. *Land Degrad Develop*. 2017. <https://doi.org/10.1002/ldr.2761>
26. Hagemann N, Joseph S, Schmidt HP, Kammann CI, Harter J, Borch T, *et al.* Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01123-0>
27. Olmo M, Albuquerque JA, Barrón V, del Campillo MC, Gallardo A, Fuentes M, *et al.* Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions. *Biol Fertil Soils*. 2014; 50: 1177-1187. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0959-y>
28. Olmo M, Villar R, Salazar P, Albuquerque JA. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. *Plant Soil*. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2700-5>
29. Xiang Y, Deng Q, Duan H, Guo Y. Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*. 2017; 9: 1563-1572. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12449>
30. Farhangi-Abriz S, Torabian S. Biochar improved nodulation and nitrogen metabolism of soybean under salt stress. *Symbiosis*. 2018; 74:215-223. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0509-0>
31. Wang C, Alidoust D, Yang X, Isoda A. Effects of bamboo biochar on soybean root nodulation in multi-elements contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018; 150:62-69. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2017.12.036>
32. Sun CX, Chen X, Cao MM, Li MQ, Zhang YL. Growth and metabolic responses of maize roots to Straw biochar application at different rates. *Plant Soil*. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3229-6>
33. Granda-Mora KI, Colás-Sánchez A, Gutiérrez-Sánchez Y, Cupull-Santana R, Alvarado-Capó Y, Torres-Gutiérrez R. Efecto de aislados de *Rhizobium* sobre parámetros fenotípicos y la fijación de nitrógeno en fenotipos de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Centro Agrícola*. 2016; 43(1): 62-70.
34. Simon L. Phylogeny of the Glomales: Deciphering the Past to Understand the Present. *New Phytologist*. 1996; 133(1): 95-101.
35. Akhtar SS, Andersen MN, Naveed M, Zahir ZA, Liu F. Interactive effect of biochar and plant growth-promoting bacterial endophytes on ameliorating salinity stress in maize. *Functional Plant Biology*. 2015. <http://dx.doi.org/10.1071/FP15054>
36. Egamberdieva D, Wirth S, Behrendt U, Abd_Allah EF, Berg G. Biochar Treatment Resulted in a Combined Effect on Soybean Growth Promotion and a Shift in Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Front. Microbiol*. 2016; 7: 209. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00209>
37. Hashem A, Kumar A, Al-Dbass AM, Alqarawi AA, Fahad Al-Arjani A-B, Singh G, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi Journal of Biological*

- Sciences. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.11.005>
38. Wang R, Wei S, Jia P, Liu T, Hou D, Xie R, *et al.* Biochar significantly alters rhizobacterial communities and reduces Cd concentration in rice grains grown on Cd-contaminated soils. *Science of the Total Environment*. 2019; 676: 627-638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.133>
39. Liu C, Liu F, Ravnskov S, Rubæk GH, Sun Z, Andersen MN. Impact of Wood Biochar and Its Interactions with Mycorrhizal Fungi, Phosphorus Fertilization and Irrigation Strategies on Potato Growth. *J Agro Crop Sci*. 2016. <https://doi.org/10.1111/jac.12185>
40. Saxena J, Rana G, Pandey M. Impact of addition of biochar along with *Bacillus* sp. on growth and yield of French beans. *Scientia Horticulturae*. 2013; 162: 351-356.
41. Nzanza, B, Marais D, Soundy P. Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation and biochar amendment on growth and yield of tomato. *Int. J. Agric. Biol*. 2012; 14: 965-969.
42. Kasmaei LS, Yasrebi J, Zarei M, Ronaghi A, Ghasemi R, Saharkhiz MJ, *et al.* Influence of plant growth promoting rhizobacteria, compost, and biochar of *Azolla* on rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) growth and some soil quality indicators in a calcareous soil, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2018. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1554669>
43. Aggangan NS, Cortes AD, Opulencia RB, Jomao-as JG, Yecyec RP. Effects of Mycorrhizal Fungi and Bamboo Biochar on the Rhizosphere Bacterial Population and Nutrient Uptake of Cacao (*Theobroma cacao* L.) Seedlings. *Philippine Journal of Crop Science (PJCS)*. 2019; 44 (1):1-9.
44. Zhuo F, Zhang XF, Lei LL, Yan TX, Lu RR, Hu ZH, *et al.* The effect of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on the growth and Cd/Pb accumulation in *Zea mays*. *International Journal of Phytoremediation*. 2020. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1725867>
45. Moller L. Soil yeasts, mycorrhizal fungi and biochar: their interactions and effect on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and nutrition. [Tesis en opción al grado de Master en Ciencias en Microbiología]. Universidad de Stellenbosch, 2012.
46. Ajema L. Effects of Biochar Application on Beneficial Soil Organism Review. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 2018; 5(5): 9-18.
47. Schmidt HP, Hagemann N, Draper K, Kammann C. The use of biochar in animal feeding. *PeerJ*. 2019; 7:e7373. <https://doi.org/10.7717/peerj.7373>
48. Sun T, Levin BDA, Guzman JLL, Enders A, Muller DA, Angenent LT, *et al.* Rapid electron transfer by the carbon matrix in natural pyrogenic carbon. *Nature Communications* . 2017; 8(1):14873. <https://doi.org/10.1038/ncomms14873>
49. Vejvodová K, Száková J, García-Sánchez M, Praus L, García Romera I, Tlustoš P. Effect of Dry Olive Residue-Based Biochar and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on the Nutrient Status and Trace Element Contents in Wheat Grown in the As-, Cd-, Pb-, and Zn-Contaminated Soils. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00193-2>
50. Qiao YH, Crowley D, Wang K, Zhang HQ, Li HF. Effects of biochar and Arbuscular mycorrhizae on bioavailability of potentially toxic elements in an aged contaminated soil. *Environ Pollut*. 2015; 206: 636-643.
51. Hammer EC, Balogh-Brunstad Z, Jakobsen I, Olsson PA, Stipp SLS, Rillig MC. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces *Soil Biology and Biochemistry*. 2014; 77: 252-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.012>.
52. Edwards CA. The importance of earthworms as key representatives of the soil fauna. En: Edwards, C.A. (Ed.), *Earthworm Ecology*, segunda ed. Florida, Boca Raton. 2004, pp. 3-11.
53. Garbuz S, Camps-Arbestain M, Mackay A, DeVantier B, Minor M. The interactions between biochar and earthworms, and their influence on soil properties and clover growth: A 6-month mesocosm experiment. *Applied Soil Ecology*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103402>.

54. Liesch AM, Weyers SL, Gaskin JW, Das KC. Impact of two different biochars on earthworm growth and survival. *Annals of Environmental Science*. 2010; 4: 1-9.
55. Gomez-Eyles JL, Sizmur T, Collins CD, Hodson ME. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environmental Pollution*. 2011; 159: 616-622.
56. Li D, Hockaday WC, Masiello CA, Alvarez PJJ. Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting. *Soil Biology & Biochemistry* 43. 2011; 1732-1737.
57. International Biochar Initiative (IBI). 2015. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. Version 1.1. Disponible en https://www.biocharinternational.org/wp-content/uploads/2018/04/Technical-Note_Standards-V1.1.pdf.
58. EBC. "European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar". European Biochar foundation (EBC) Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org/en/download>. Versión 6.2E del 4 de febrero de 2016, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043>
59. Noguera D, Rondón M, Laossi KR, Hoyos V, Lavelle P, Cruz de Carvalho MH, *et al.* Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biology & Biochemistry* . 2010; 42: 1017-1027.
60. Spokas KA, Novak JM, Stewart CE, Cantrell KB, Uchimiya M, DuSaire MG, *et al.* Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere*. 2011; 85: 869-882.
61. Rogovska N, Laird D, Leandro L, Aller D. Biochar effect on severity of soybean root disease caused by *Fusarium virguliforme*. *Plant Soil* . 2016. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3086-8>
62. Rahayu DS, Sari NP. Development of *Pratylenchus coffeae* in Biochar Applied Soil, Coffee Roots and Its Effect on Plant Growth. *Pelita Perkebunan*. 2017; 33 (1): 24-32.
63. Cao Y, Gao Y, Qi Y, Li J. Biochar-enhanced composts reduce the potential leaching of nutrients and heavy metals and suppress plant-parasitic nematodes in excessively fertilized cucumber soils. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1061-4>.
64. Madriz K. Mecanismos de defensa en las interacciones planta-patógeno. *Manejo Integrado de Plagas*. 2002; 63: 22-32.
65. Van der Ent S, Van Wees SC, Pieterse CM. Jasmonate signaling in plant interactions with resistance-inducing beneficial microbes. *Phytochemistry*. 2009; 70: 1581-1588.
66. Vallad GE, Goodman RM. Systemic acquired resistance and induced systemic resistance in conventional agriculture. *Crop Science*. 2004; 44: 1920-1934.
67. Harman GE, Howell CR, Vitebro RA, Chet I, Lorito M. *Trichoderma* species - opportunistic, avirulent plant symbionts. *National Reviews of Microbiology*. 2004; 2: 43-56.
68. Akhter A, Hage-Ahmed K, Soja G, Steinkellner S. Potential of *Fusarium* wilt-inducing chlamydospores, *in vitro* behaviour in root exudates and physiology of tomato in biochar and compost amended soil. *Plant Soil* . 2016; 406:425-440. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2948-4>
69. McCormack SA, Ostle N, Bardgett RD, Hopkins DW, Vanbergen AJ. Biochar in bioenergy cropping systems: impacts on soil faunal communities and linked ecosystem processes. *GCB Bioenergy* . 2013; 5: 81-95. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12046>
70. Graber ER, Meller Harel YM, Kolton M, Cytryn E, Silber A, Rav David DR, *et al.* Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*. 2010; 337: 481-496.
71. Meller Harel Y, Elad Y, Rav-David D, Borenstein M, Shulchani R, Lew B, *et al.* Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. *Plant Soil* . 2012; 357(1-2): 245-257.
72. Haile ZM, Meller Harel Y, Rav-David D, Graber ER, Elad Y. The nature of systemic resistance induced in tomato (*Solanum lycopersicum*) by biochar soil treatments. Induced resistance in plants against insects

- and diseases IOBC-WPRS Bulletin. 2013; 89: 227-230.
73. Viger M, Hancock RD, Miglietta F, Taylor G. More plant growth but less plant defense? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar. *GCB Bioenergy* . 2015; 7: 658-672. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12182>
 74. Mehari ZH, Elad Y, Rav-David D, Graber ER, Meller Harel Y. Induced systemic resistance in tomato (*Solanum lycopersicum*) against *Botrytis cinerea* by biochar amendment involves jasmonic acid signaling. *Plant Soil* . 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2445-1>
 75. Kulbat K. The role of phenolic compounds in plant resistance. *Biotechnol Food Sci*. 2016; 80(2): 97-108.
 76. Khalifa W. Biochar Soil Amendment Induced Resistance in Tomato against Tobacco Mosaic Virus. *Middle East J. Agric. Res*. 2017; 6(4): 1478-1489. ISSN: 2077-4605
 77. Hunt J, DuPont M, Sato D, Kawabata A. The Basics of Biochar: A Natural Soil Amendment. Hawaii, US. (En línea). 2010. Consultado 6 de mayo de 2020. Disponible en <http://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/SCM-30.pdf> .
 78. Vecstaudza D, Senkovs M, Nikolajeva V, Kasparinskis R, Muter O. Wooden biochar as a carrier for endophytic isolates. *Rhizosphere*. 2017; 3: 126-127.
 79. Martínez B, Infante D, Reyes Y. *Trichoderma* spp. y su función en el control de plagas en los cultivos. *Rev. Protección Veg*. 2013; 28(1):1-11.
 80. González-Marquetti I, Ynfante-Martínez D, Arias-Vargas Y, Gorrita-Ramírez S, Hernández-García T, de la Noval-Pons BM, *et al*. Efecto de *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckfeldt & Nirenberg sobre indicadores de crecimiento y desarrollo de *Phaseolus vulgaris* L. cultivar BAT-304. *Rev. Protección Veg* . 2019;34(2).
 81. Graber ER, Meller Harel YM, Kolton M, Cytryn E, Silber A, Rav David DR, *et al*. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil* . 2010; 337: 481-496.
 82. Vecstaudza D, Grantina-Ievina L, Makarenkova G, Kasparinskis R, Selga T, Steinberga V, *et al*. The impact of wood-derived biochar on the survival of *Trichoderma* spp. and growth of *Secale cereale* L. in sandy soil. *Biocontrol Science and Technology*. 2018, <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1450488>
 83. Muter O, Grantina-Ievina L, Makarenkova G, Vecstaudza D, Strikauska S, Selga T, *et al*. Effect of biochar and *Trichoderma* application on fungal diversity and growth of *Zea mays* in a sandy loam soil. *Environmental and Experimental Biology*. 2017; 15: 289-296. <https://doi.org/10.22364/eeb.15.30>
 84. Araujo AS, Bassay-Blum LE, Figueiredo CC. Biochar and *Trichoderma harzianum* for the Control of *Macrophomina phaseolina*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2019; 62: e19180259.
 85. Blok C, Diaz A, Oud N, Streminska M, Huisman M, Khanh P, *et al*. Biochar as a carrier: *Trichoderma harzianum* on Biochar to promote disease suppression in Strawberry. Report WPR-893. Wageningen University & Research. 2019. <https://doi.org/10.18174/501687>
 86. Imran, Amanullah, Arif M, Shah Z, Bari A. Soil application of *Trichoderma* and peach (*Prunus persica* L.) residues possesses biocontrol potential for weeds and enhances growth and profitability of soybean (*Glycine max*). *Sarhad Journal of Agriculture*. 2020; 36(1): 10-20. <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2020/36.1.10.20>.
 87. Phoungthong K, Zhang H, Shao LM, He PJ. Leaching characteristics and phytotoxic effects of sewage sludge biochar. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2018, <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0763-0>.
 88. Mayer P, Hilber I, Gouliarmou V, Hale SE, Cornelissen G, Bucheli TD. How to Determine the Environmental Exposure of PAHs Originating from Biochar. *Environ. Sci. Technol*. 2016; 50: 1941-1948. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05603>
 89. Frenkel O, Jaiswal AK, Elad Y, Lew B, Kammann C, Graber ER. The effect of biochar on plant diseases: what should we

- learn while designing biochar substrates? Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. 2017; 25(2): 105-113. <https://doi.org/10.3846/16486897.2017.1307202>
90. Graber ER, Frenkel O, Jaiswal AK, Elad Y. How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? Carbon Management. 2014; 5(2): 169-183.
91. Luo S, He B, Song D, Li T, Wu Y, Yang L. Response of bacterial community structure to different biochar addition dosages in Karst Yellow soil planted with ryegrass and daylily. Sustainability 2020, 12, 2124. <https://doi.org/10.3390/su12052124>
92. Arteaga-Crespo Y, Carballo-Abreu LR, García-Quintana Y, Alonso-López M, Geda-López G. Caracterización del aserrín de *Acacia mangium* Willd para la obtención de biocarbón. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 2012; 8(2): 90-95.
93. Alonso-López M, Arteaga-Crespo Y, Carballo-Abreu L, Geda-López G, García-Quintana Y, Castillo-Martínez I. Efecto del biocarbón en las propiedades físicas de diferentes sustratos orgánicos. Revista Cubana de Ciencias Forestales. 2013; 1(1): 12-22.
94. Pedroso-Reynaldo A, Pentón-Fernández G. Efecto físico-químico que ejerce la fuente de energía de soluciones nutritivas sobre el biochar enriquecido. Ponencia presentada en la V Convención Internacional de Agrodesarrollo 2019, Cuba. 2019.
95. Pentón-Fernández G, Schmidt HP, Milera-Rodríguez MC, Martín-Martín GJ, Brea-Maure O, Brunet-Zulueta J. Empleo de fertilizantes orgánicos basados en biochar producidos a partir de residuos agropecuarios. En Manejo agroecológico de los sistemas agropecuarios Usos del suelo con abonos y biochar. Pp 54-66. 2020. Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey Editorial EEPF “Indio Hatuey”. ISBN: 978-959-7138-41-9

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores: **Ivonne González Marquetti:** Concibió la idea de realizar un artículo de revisión al respecto de en uso del Biochar en la defensa de las plantas ante el ataque de plagas. Participó en la búsqueda de información. Fue responsable de la redacción del manuscrito. **Mayra G. Rodríguez:** Participó en la búsqueda de información. Contribuyó con la revisión crítica del contenido del artículo y en la aprobación final. **Belkis Peteira Delgado-Oramas:** Concibió la idea de realizar este artículo de revisión. Participó en la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final. Líder de temática en la interacción hospedante-patógeno. **Hans-Peter Shmidt:** Participó en la revisión del borrador, con importantes aportes en la explicación de diversos puntos de vista sobre las interpretaciones de la literatura revisada. Líder del proyecto “Re-cycling of biomass nutrients and carbon for advanced organic fertilization in an ecosmart and climate positive agriculture on Cuba (Bio-C)”.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)