

CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL DE BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE ARROZ

NUTRIENT CONCENTRATION OF RICE HUSK BIOCHAR

Jazmín Velázquez-Maldonado¹, Porfirio Juárez-López^{1*}, José Anzaldo-Hernández²,
Gelacio Alejo-Santiago³, Luis Alonso Valdez-Aguilar⁴, Irán Alía-Tejcal¹,
Víctor López-Martínez¹, G. Alicia Pérez-Arias¹ y Dagoberto Guillén-Sánchez¹

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Cuernavaca, Morelos, México. ²Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Guadalajara, Jalisco, México. ³Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura, Xalisco, Nayarit, México. ⁴Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Saltillo, Coahuila México.

*Autor para correspondencia (porfiriojlopez@yahoo.com)

RESUMEN

El biocarbón es un material sólido poroso que se produce por la conversión termoquímica de materiales orgánicos en un ambiente limitado o en ausencia de oxígeno; tiene propiedades físico-químicas aptas para el almacenamiento a largo plazo de carbono y, potencialmente, mejora la fertilidad de los suelos. El objetivo del presente estudio fue evaluar la concentración nutrimental en biocarbón elaborado con cascarilla de arroz (*Oryza sativa* L.) y adicionado con ácido cítrico, maleico y propiónico al 5 y 10 % como catalizadores. El biocarbón se elaboró con la técnica de carbonización hidrotérmica a 200 °C durante 19 h. Se determinó el rendimiento de biocarbón, concentración de materia orgánica y de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Si y Na. Los mayores rendimientos de biocarbón (66 %) se obtuvieron cuando se añadieron los ácidos maleico y cítrico al 10 %. El mayor contenido de materia orgánica (71 %) se obtuvo con ácido maleico al 5 %. En general, los tres macronutrientes con mayor concentración (mg kg⁻¹) fueron Ca (4386-10,988), N (3067-4467) y K (327-3530), mientras que los micronutrientes con mayor concentración (mg kg⁻¹) fueron Fe (77.1-238.3) y Mn (75.4-281.4), así como el elemento benéfico Na (92.8-160.0). Por sus características de rendimiento, concentraciones de materia orgánica y nutrimental, el biocarbón de cascarilla de arroz potencialmente se podría usar como mejorador de suelos agrícolas.

Palabras clave: *Oryza sativa*, carbonización hidrotérmica, biomasa, macronutrientes, micronutrientes.

SUMMARY

Biochar is a porous, solid material that is produced by the thermochemical conversion of organic materials under a limited or oxygen-free environment; it has physical and chemical properties suitable for the long-term storage of carbon, and potentially, improves the fertility of soils. The objective of this study was to evaluate the nutrient concentration of biochar prepared with rice (*Oryza sativa* L.) husk and added with citric, maleic and propionic acids at 5 and 10 % as catalysts. The biochar was prepared through the hydrothermal carbonization technique at 200 °C for 19 h. The yield of biochar and concentration of organic matter, N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn, Si and Na were determined. The highest yields of biochar (66%) were obtained when 10 % maleic and citric acids were added. The highest content of organic matter (71%) was obtained with 5 % maleic acid. In general, the three macronutrients with the highest concentration (mg kg⁻¹) were Ca (4386-10,988), N (3067-4467) and K (327-3530), while the micronutrients with the highest concentration (mg kg⁻¹) were Fe (77.1-238.3) and Mn (75.4-281.4), as well as the beneficial element Na (92.8-160.0). Due to its yield, organic matter and nutrient concentrations, the rice husk biochar could be used, potentially, as an improver of agricultural soils.

Index words: *Oryza sativa*, hydrothermal carbonization, biomass, macronutrients, micronutrients.

INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de los suelos ha ocasionado que éstos se degraden y que pierdan su fertilidad, por lo que se han empleado técnicas agronómicas para su mejoramiento. Entre las prácticas agrícolas que se realizan para mejorar la fertilidad del suelo se encuentra la incorporación de compostas, residuos de cosechas, pajas, cascarillas y, recientemente, el uso de biocarbón (Adeyemi e Idowu, 2017; Escalante *et al.*, 2016; Medina y Medina, 2018).

El biocarbón es un material sólido y poroso que se produce por la conversión termoquímica de materiales orgánicos en un ambiente limitado o carente de oxígeno, el cual tiene propiedades físico-químicas aptas para el almacenamiento a largo plazo de carbono y, potencialmente, la mejora de la fertilidad de los suelos (Ibarrola *et al.*, 2013). El biocarbón es el resultado de la carbonización de materias primas vegetales, como residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel, cascarilla de arroz y desechos de varias especies vegetales (Escalante *et al.*, 2016). Se puede obtener biocarbón de casi cualquier biomasa, pero es particularmente apropiada la de origen vegetal, sobre todo la constituida por materiales lignocelulósicos, que son el constituyente predominante de la vegetación terrestre, después del agua (Quesada-Kimsey, 2012).

Existen varias tecnologías termoquímicas para producir biocarbón, tales como la pirólisis (lenta, rápida y ultrarrápida), gasificación y conversión hidrotérmica (HTC) (Zheng *et al.*, 2016). Esta última técnica consiste en someter el material a temperaturas altas, sumergido en agua, sin permitir que haya ebullición. Se ha observado que con este tipo de reacción es posible carbonizar materiales

lignocelulósicos sólidos y se obtienen como productos materiales carbonosos nanoestructurados (Baccile *et al.*, 2010).

Entre los factores que afectan el mecanismo y la cinética de las reacciones de pirólisis en la producción de biocarbón, se encuentran la composición del sustrato (material vegetal), intervalo de calentamiento, temperatura y presión del biorreactor, la atmósfera ambiental presente y el uso de catalizadores. Estas variables tienen un efecto profundo en la secuencia y cinética de las reacciones termoquímicas y, por tanto, en el rendimiento de los productos formados (Escalante *et al.*, 2016; Kambo y Dutta, 2015). Al respecto del uso de catalizadores, Lynam *et al.* (2012) y Lynam *et al.* (2011) sugieren el uso de ácidos o sales como catalizadores durante el proceso de HTC, ya que favorecen la eficiencia de hidrólisis de celulosa y hemicelulosa, lo que puede influir en el rendimiento del biocarbón producido; además, el uso de catalizadores ácidos puede influir en la concentración nutrimental del biocarbón (Centurion *et al.*, 2017).

Existen estudios que indican que la aplicación de biocarbón en suelos agrícolas mejora el rendimiento en diversos cultivos como *Amaranthus viridis* e *Ipomoea reptans* (Rosenani *et al.*, 2014), *Solanum lycopersicum* (Villamagua *et al.*, 2014) e *Ipomoea aquatica* (Varela *et al.*, 2013); además, también mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo (Ding *et al.*, 2016; Schulz *et al.*, 2013). Adicionalmente, el biocarbón funciona como agente secuestrante del carbono presente en la atmósfera, lo que puede contribuir a la mitigación del cambio climático (Adeyemi e Idowu, 2017; Gurwick *et al.*, 2013).

En México, en el año 2017 se cosecharon 41,560 ha de arroz, con una producción de 265,567 t (SIAP, 2019). Si se considera que el peso de la cascarilla en arroz seco es de aproximadamente 27 % (Rodríguez y Grant, 2015), se estima que en ese mismo año se produjeron 71,703 t de cascarilla, lo que significa que potencialmente se tiene la materia prima para producir biocarbón de cascarilla de arroz y, al mismo tiempo, aprovechar el subproducto de este cultivo.

Por otro lado, la mayoría de los estudios de caracterización química de biocarbón se enfocan en la concentración de C, H, O y N (Kambo y Dutta, 2015; Schneider *et al.*, 2011) y son escasos los reportes que incluyen el contenido nutrimental de otros macronutrientes de importancia en la nutrición de cultivos, y más raros aun los que abordan la concentración de micronutrientes. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar la concentración nutrimental de biocarbón elaborado a partir de cascarilla de arroz, adicionado con los ácidos cítrico, maleico y

propiónico como catalizadores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Elaboración del biocarbón y tratamientos

Se utilizó cascarilla de arroz proveniente de un molino comercial ubicado en Cuautla, Morelos, México. El biocarbón se obtuvo por medio de la técnica de carbonización hidrotérmica (HTC) con la metodología reportada por Reza *et al.* (2015) con algunas modificaciones. Se pesaron 25 g de cascarilla de arroz (base seca), con humedad inicial de 10.9 %; después, se adicionó agua a las muestras hasta obtener una humedad final de 50 %. Posteriormente, a cada muestra se le adicionó el catalizador correspondiente (ácido cítrico, ácido maleico o ácido propiónico) en concentraciones de 5 y 10 % con respecto al peso de la cascarilla en base seca. Como testigo se utilizó la misma mezcla sin adicionar ácidos. Posteriormente, las muestras se colocaron en un reactor (modelo JAYME Deutsch and Neumann®, Berlín, Alemania) durante 19 h a 200 °C; después, se dejó enfriar el reactor a temperatura ambiente. Al material obtenido se le realizó un triple lavado con agua destilada-etanol 96 %-agua destilada. Finalmente, el biocarbón se secó en una estufa de aire circulante (modelo F210 Felisa®, Guadalajara, Jalisco, México) a 105 °C durante 8 h.

Rendimiento de biocarbón

El rendimiento del biocarbón se determinó mediante la diferencia entre el peso de la cascarilla cruda (biomasa inicial) y el peso de la cascarilla convertida en biocarbón; posteriormente, el valor obtenido se expresó en términos de porcentaje.

Materia orgánica

La concentración de materia orgánica del biocarbón se determinó por calcinación a 550 °C durante 5 min (Wang y Mulligan, 2009), en una mufla (12-PR-300, Hobersal®, Barcelona, España). Se expresó en porcentaje tras considerar el peso original del biocarbón y el peso del biocarbón después del proceso de incineración.

Concentración nutrimental

Se realizó una extracción en digestión húmeda mediante los procedimientos descritos por Alcántar y Sandoval (1999). Para el caso del N se utilizó una mezcla de ácido sulfúrico con ácido salicílico, mientras que para el Ca, Mg, P, K, Si y Na se usó una mezcla con ácido nítrico y ácido perclórico. Se determinó el contenido total de N por el método semi-microkjeldahl, P por colorimetría, con un

espectrofotómetro (Hach®, Loveland, Colorado, EUA); K y Na por flamometría con un flamómetro (Flame Photometer 410®, Hamburgo, Alemania); Ca, Mg y Si por espectrofotometría con un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian SpectrAA®, Melbourne, Australia).

Estructura del biocarbón

Se molieron 0.01 g de biocarbón y la muestra se fijó en un portamuestras con una cinta adhesiva de doble cara, cuidando no dejar material carbonoso sin adherir. Las muestras se recubrieron mediante pulverización con oro (Varela *et al.*, 2013). Se analizó con un microscopio electrónico de barrido (JEOL 6400®, Houghton, Michigan, EUA).

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar con cinco repeticiones. A los resultados se les realizó análisis de varianza. Cuando el análisis de varianza detectó diferencia estadística, se aplicó una prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el programa estadístico SAS versión 9.1 (SAS Institute, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento del biocarbón

Hubo diferencias ($P \leq 0.05$) en el rendimiento de biocarbón en función de los catalizadores empleados (Cuadro 1), el cual varió de 54 % (ácido propiónico 5 %) hasta 66 % (ácido cítrico 10 % y ácido maleico 10 %). No se encontraron reportes en la literatura revisada con relación

al rendimiento de biocarbón asociado con la adición de los ácidos empleados en el presente estudio; sin embargo, Centurion *et al.* (2017), en la elaboración de biocarbón a partir de mezclas de vinaza y bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), reportaron que al aplicar ácido bórico a concentración de 0.1 M obtuvieron 20 % de rendimiento, mientras que al aplicar ácido sulfúrico en la misma concentración el rendimiento fue de 35 %.

En general, los resultados son aproximados a los reportados por Kalderis *et al.* (2014), quienes al elaborar biocarbón de cascarilla de arroz reportaron rendimientos de entre 58 y 66 %. Por otro lado, los resultados obtenidos son superiores a los de Albuquerque *et al.* (2014), quienes reportaron rendimiento de 37.8 % en biocarbón elaborado a partir de paja de trigo (*Triticum spp.*), a los de Onay (2014), quien encontró rendimiento de 18 % en biocarbón de semillas de laurel (*Laurus nobilis L.*) y a los de Medina y Medina (2018), quienes en biocarbón de residuos de aguacate (*Persea americana*) reportaron un rendimiento de 16 %. Al respecto, el rendimiento del biocarbón depende del tipo de material vegetal empleado, intervalo de calentamiento, temperatura y presión del biorreactor y el uso de catalizadores (Kambo y Dutta, 2015). Asimismo, la adición de catalizadores ácidos puede influir en el rendimiento, debido a que favorecen la degradación de la celulosa y hemicelulosa (Lynam *et al.*, 2011; 2012).

Materia orgánica

Se observaron diferencias ($P \leq 0.05$) en la concentración de materia orgánica del biocarbón con los catalizadores utilizados, la cual varió de 65 a 71 % (Cuadro 1). Centurion *et al.* (2017) reportaron diferencias en la concentración de

Cuadro 1. Rendimiento, materia orgánica (MO) y concentración de macronutrientes de biocarbón elaborado de cascarilla de arroz con tres catalizadores.

Tratamiento	Rendimiento (%)	MO	N	P	K	Ca	Mg
					(mg kg ⁻¹)		
Agua (Testigo)	50 f	66 c	3067 c	164 g	406 f	4387 d	483 g
Ácido maleico 5 %	64 b	71 a	3367 c	475 d	979 c	8788 b	804 e
Ácido maleico 10 %	66 a	65 c	3133 c	345 e	327 g	6587 c	554 f
Ácido cítrico 5 %	61 c	68 b	3700 bc	215 f	722 d	4386 d	911 d
Ácido cítrico 10 %	66 a	70 ab	3267 c	504 c	1,117 b	10988 a	983 c
Ácido propiónico 5 %	54 e	66 c	4233 ab	527 b	544 e	10978 a	1018 b
Ácido propiónico 10 %	58 d	66 c	4467 a	849 a	3530 a	5487 d	1447 a
CV (%)	1.7	1.0	6.8	9.3	11.1	12.8	10.4
DSH (0.05)	1.1	2.1	699.5	261.2	35.9	1,947.3	34.7

Medias con letras iguales dentro de las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), CV: coeficiente de variación, DSH: diferencia significativa honesta.

materia orgánica al adicionar los ácidos sulfúrico, fosfórico y bórico a concentración de 0.1 M en la elaboración de biocarbón a partir de mezclas de vinaza y bagazo de caña de azúcar. Independientemente del catalizador empleado, los valores obtenidos son ligeramente superiores a los de George *et al.* (2017), quienes reportaron 60.9 % de materia orgánica en biocarbón de residuos de poda de olivo (*Olea europaea*); asimismo, los resultados son superiores a los reportados por Medina y Medina (2018), quienes reportaron de 18.8 a 22.6 % de materia orgánica en biocarbón de caña de azúcar y de 59.2 % en biocarbón de cachaza de caña. Al igual que el rendimiento, la materia orgánica depende del material vegetal utilizado para elaborar los biocarbones.

Concentración de macronutrientes

Hubo diferencias ($P \leq 0.05$) en la concentración de macronutrientes en función del catalizador empleado en la elaboración del biocarbón (Cuadro 1). En este sentido, las concentraciones mayores de N, P, K y Mg se obtuvieron con ácido propiónico 10 %, y para el Ca con ácido cítrico 10 % y ácido propiónico 5 %. Lo anterior concuerda con lo reportado por Centurion *et al.* (2017), quienes encontraron diferencias en la concentración de macronutrientes (C, H, N, S y O) al adicionar los ácidos sulfúrico, fosfórico y bórico a concentración de 0.1 M en la elaboración de biocarbón con mezclas de vinaza y bagazo de caña de azúcar. Los resultados del presente estudio indican que la adición de catalizadores favoreció la concentración de macronutrientes en biocarbón de cascarilla de arroz, ya que los valores fueron superiores a los del testigo.

En general, independientemente del catalizador empleado, la concentración de macronutrientes en orden decreciente fue como sigue: $Ca > N > Mg > K > P$ (Cuadro 1). Esta secuencia de concentraciones es diferente a la reportada por George *et al.* (2017), quienes en biocarbón de maíz (*Zea mays*) ensilado encontraron que $K > Mg > Ca > N > S$. Las concentraciones de macronutrientes fueron menores a las reportadas por Iqbal *et al.* (2015), quienes en biocarbón de residuos de poda forestal reportaron para N 13,000, P 8000, K 7000, Ca 20,000 y Mg 6000 mg kg⁻¹.

Los valores obtenidos para N y Ca son aproximados a los reportados por George *et al.* (2017), quienes encontraron 3760 y 8640 mg kg⁻¹, respectivamente; pero los valores para P, K y Mg son menores a los reportados por los mismos autores, de 8409, 40,395 y 10,110 mg kg⁻¹, respectivamente.

Concentración de micronutrientes

En lo que respecta a la concentración de micronutrientes hubo diferencias ($P \leq 0.05$) por efecto del catalizador utilizado (Cuadro 2). Con excepción del Fe, el ácido propiónico 10 % favoreció la concentración de los micronutrientes. De igual manera, la concentración de micronutrientes se favoreció con al menos una concentración de los ácidos aplicados como catalizadores, con excepción de la concentración de Cu y Na. Centurion *et al.* (2017) también reportaron diferencias en la concentración de micronutrientes (Fe, B, Zn, Cu y Mn) al adicionar los ácidos sulfúrico, fosfórico y bórico a concentración de 0.1 M en la elaboración de biocarbón a partir de mezclas de vinaza y bagazo de caña de azúcar.

Cuadro 2. Concentración de micronutrientes y del elemento benéfico Na en el biocarbón de cascarilla de arroz con diferentes catalizadores.

Tratamiento	Fe	Cu	Mn	Zn	Si	Na
	(mg kg ⁻¹)					
Agua (Testigo)	77.1 f	53.0 a	75.4 g	20.1 b	26.3 bc	132.4 a
Ácido maleico 5 %	123.1 e	44.7 ab	118.0 e	24.8 b	27.6 abc	130.5 a
Ácido maleico 10 %	215.2 c	47.7 ab	120.9 d	25.9 b	25.6 bc	92.8 b
Ácido cítrico 5 %	77.1 f	38.6 b	101.0 f	23.2 b	30.4 ab	144.4 a
Ácido cítrico 10 %	230.6 b	45.0 ab	123.7 c	16.7 b	23.9 c	154.3 a
Ácido propiónico 5 %	238.3 a	47.7 ab	152.1 b	22.2 b	32.4 a	160.0 a
Ácido propiónico 10 %	199.9 d	43.7 ab	281.4 a	58.4 a	28.7 abc	144.4 a
CV (%)	8.2	9.5	5.7	12.8	7.1	9.3
DSH (0.05)	6.9	12.5	2.3	9.9	5.7	36.3

Medias con letras iguales dentro de las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$), CV: coeficiente de variación, DSH: diferencia significativa honesta.

En general, independientemente del catalizador empleado, la concentración de micronutrientes en orden decreciente fue $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Si} > \text{Zn}$ (Cuadro 2). Esta secuencia de concentración coincide parcialmente con lo reportado por George *et al.* (2017), quienes en biocarbón de maíz ensilado encontraron la secuencia $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$. La concentración de Cu del presente estudio fue similar a la reportada por Iqbal *et al.* (2015), quienes en biocarbón de residuos de poda forestal encontraron 45 mg kg^{-1} de este micronutriente, pero los valores de Zn y Mn fueron menores a los obtenidos por esos autores (183 y 464 mg kg^{-1} , respectivamente). Por otro lado, con excepción del Cu, los valores del presente estudio para Fe, Mn, Na, Si y Zn fueron menores a los reportados por George *et al.*, (2017), quienes en biocarbón de maíz ensilado encontraron concentraciones (en mg kg^{-1}) de Fe 42,141, Mn 646, Na 3897, Zn 281 y $\text{Cu} < 0.1$. La concentración de Zn en el presente estudio fue mayor a la reportada por Kalderis *et al.* (2014), quienes en cascarilla de arroz reportaron 0.8 mg kg^{-1} . Estos mismos autores no detectaron la presencia de Cu, ni cuantificaron los demás micronutrientes.

La importancia de los resultados de la presente investigación reside en que éstos constituyen el primer reporte de la caracterización nutricional de biocarbón de cascarilla de arroz con fines de aplicación agrícola. No se encontraron reportes en la literatura sobre concentración de micronutrientes en función de los ácidos evaluados como catalizadores. La aplicación de los ácidos orgánicos cítrico, maleico y propiónico favorecen la concentración nutricional de algunos macro y micronutrientes.

Al igual que el rendimiento y el contenido de materia orgánica, la concentración de macro y micronutrientes es variable en función del material vegetal empleado en la elaboración del biocarbón, tal como lo reportaron Kambo y Dutta (2015). En este sentido, es necesario hacer más investigaciones relacionadas con la concentración nutricional de biocarbones con fines de mejoramiento de suelos y como fuente de nutrientes; asimismo, es necesario explorar otros materiales vegetales disponibles localmente (Medina y Medina, 2018).

Estructura del biocarbón

Se observaron microesferas de carbón de diversos tamaños, según el catalizador empleado; los valores de diámetro promedio fueron: testigo (agua) $0.055 \mu\text{m}$, ácido maleico (5 %) $0.064 \mu\text{m}$, ácido maleico (10 %) $0.082 \mu\text{m}$, ácido cítrico (5 %) $0.086 \mu\text{m}$, ácido cítrico (10 %) $0.084 \mu\text{m}$, ácido propiónico (5 %) $0.059 \mu\text{m}$ y ácido propiónico (10 %) $0.082 \mu\text{m}$ (Figura 1). Una ampliación de las microesferas formadas se puede observar en la Figura 2, para el caso de

ácido cítrico y ácido maleico al 5 %.

Con base en lo anterior, se observó que con los tres ácidos aplicados como catalizadores se incrementó el tamaño de las microesferas en comparación con el testigo. Los biocarbones que se obtienen por medio de carbonización hidrotérmica (HTC) generalmente son de superficie porosa ligera y con mejor capacidad de adsorción en comparación con el biocarbón elaborado por medio de pirólisis convencional (Regmi *et al.*, 2012). Asimismo, se ha reportado que el biocarbón producido con HTC en pH ácido incrementa 2.7 veces la superficie de área ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), el volumen de los poros ($1.1 \times 10^{-1} \text{ mL g}^{-1}$) y el tamaño de los poros (20.2 nm) en comparación con los producidos en pH alcalino (Reza *et al.*, 2015), lo que podría explicar el mayor tamaño de las microesferas con la adición de los ácidos maleico, cítrico y propiónico. Adicionalmente, cabe señalar que la formación de microesferas se favorece con la técnica de HTC. En este sentido, Hu *et al.* (2008) no observaron microesferas en la estructura superficial de biocarbón de cascarilla de arroz elaborado con la técnica de pirólisis rápida.

El biocarbón obtenido de la cascarilla de arroz por medio de carbonización hidrotérmica y elaborado con la adición de ácidos como catalizadores se podría utilizar como mejorador de suelos agrícolas, ya que la porosidad y la presencia de las microesferas de carbón en la estructura del mismo, podrían actuar como superficie de adsorción de nutrientes, lo cual reduce la lixiviación de minerales y podría hacer más eficiente el uso de fertilizantes a lo largo del ciclo de los cultivos, tal como lo reportaron Guiotoku *et al.* (2012). Si bien los resultados del presente estudio son promisorios, es necesario realizar investigaciones agronómicas para evaluar el efecto del biocarbón de cascarilla de arroz sobre el crecimiento y rendimiento de cultivos, así como su efecto en las propiedades físico-químicas en suelos u otros sustratos.

CONCLUSIONES

La adición de los ácidos maleico y cítrico al 10 % como catalizadores propician mayor rendimiento de biocarbón de cascarilla de arroz. La mayor concentración de materia orgánica se obtuvo con ácido maleico 5 %. En general, los tres macronutrientes con mayor concentración fueron Ca, N y K, mientras que para micronutrientes los de mayor concentración fueron Fe y Mn, así como el Na. Por sus características de rendimiento y concentración de materia orgánica y nutricional, el biocarbón de cascarilla de arroz potencialmente se podría usar como mejorador de suelos agrícolas.

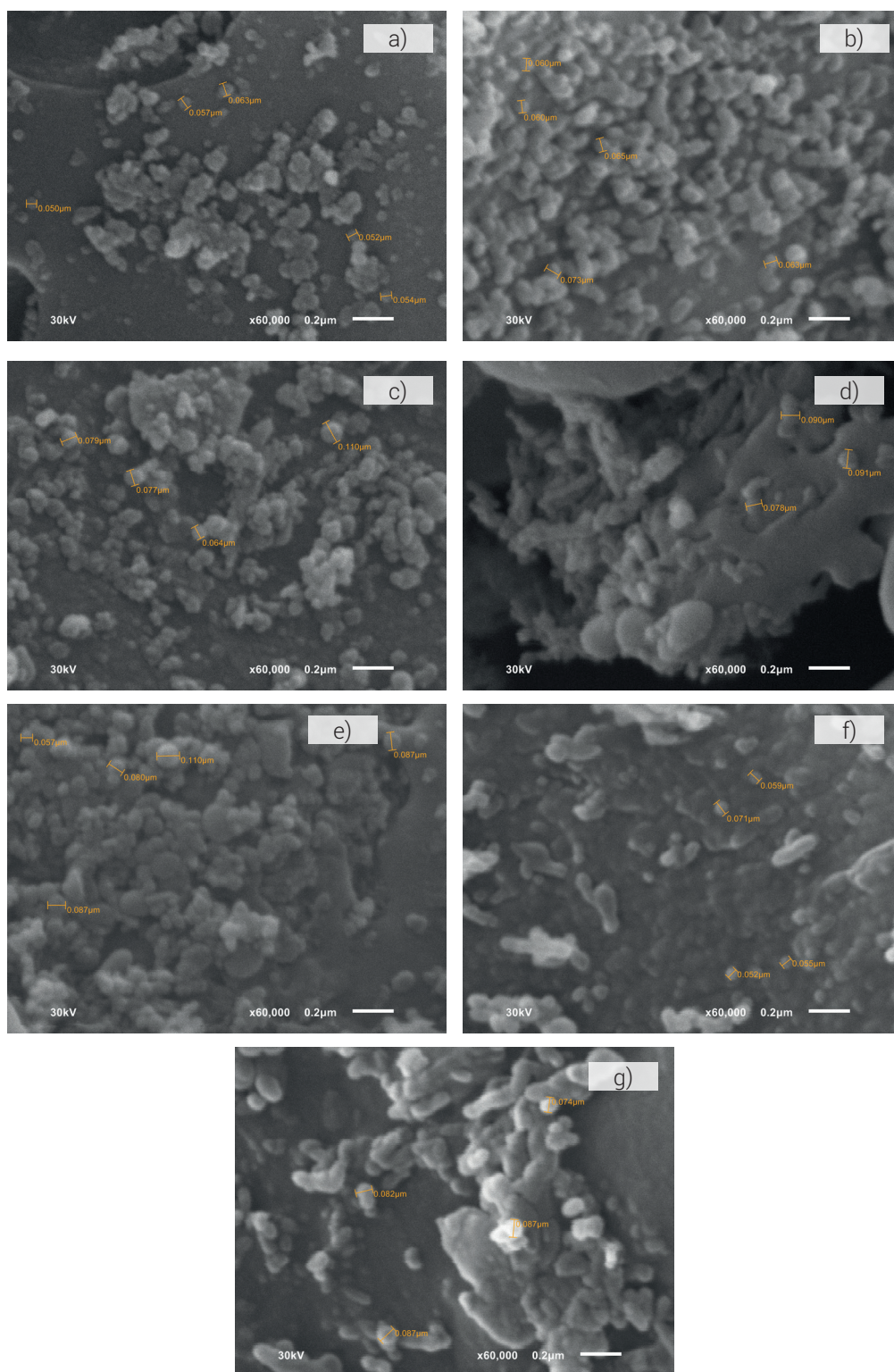


Figura 1. Microesferas en el biocarbón de cascarilla de arroz producido con diferentes catalizadores. a) agua, b) ácido maleico 5 %, c) ácido maleico 10 %, d) ácido cítrico 5 %, e) ácido cítrico 10 %, f) ácido propiónico 5 % y g) ácido propiónico 10 %.

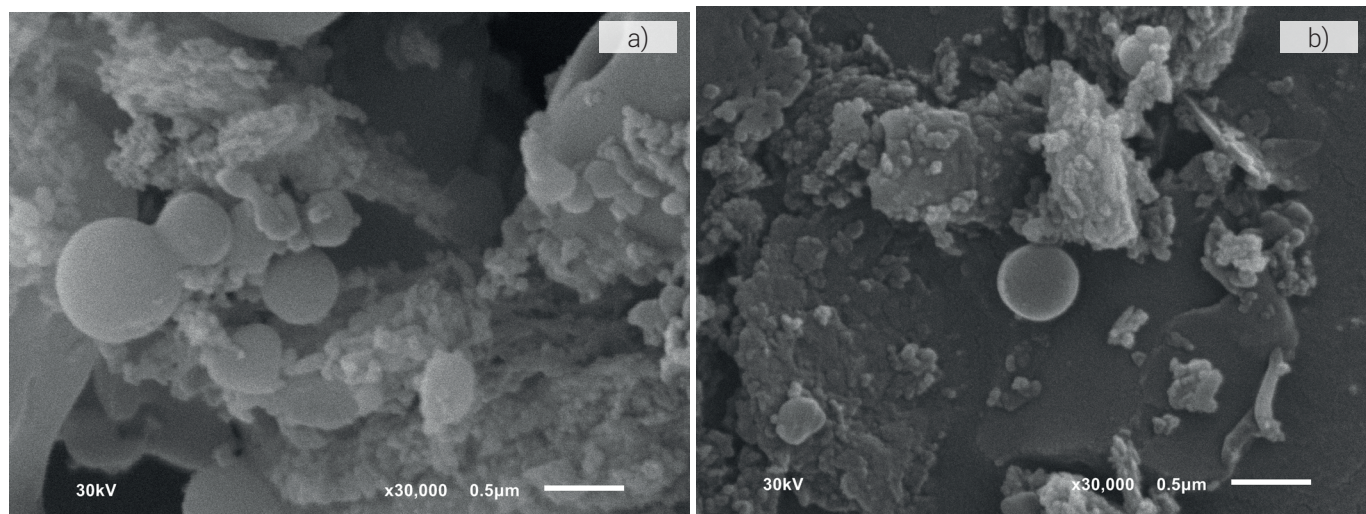


Figura 2. Microesferas en la estructura superficial de biocarbón de cascarilla de arroz elaborado con dos catalizadores: a) ácido cítrico a 5 % y b) ácido maleico a 5 %.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora (JVM) agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por la beca otorgada para estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural.

BIBLIOGRAFÍA

- Adeyemi T. O. A. and O. D. Idowu (2017) Biochar: promoting crop yield, improving soil fertility, mitigating climate change and restoring polluted soils. *World News of Natural Sciences* 8:27-36.
- Albuquerque J. A., J. M. Calero, V. Barrón, J. Torrent, M. C. del Campillo, A. Gallardo and R. Villar (2014) Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177:16-25, <https://doi.org/10.1002/jpln.201200652>
- Alcántar G. G. y M. Sandoval V. (1999) Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de Muestreo, Preparación, Análisis e Interpretación. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México. 155 p.
- Baccile N., M. Antonietti and M. M. Titirici (2010) One-step hydrothermal synthesis of nitrogen-doped nanocarbons: albumine directing the carbonization of glucose. *ChemSusChem* 3:246-253, <https://doi.org/10.1002/cssc.200900124>
- Centurion S. C., C. A. Melo, F. H. Soares, A. B. Moreira, O. P. Ferreira and M. C. Bisinoti (2017) Effect of the reaction medium on the immobilization of nutrients in hydrochars obtained using sugarcane industry residues. *Bioresource Technology* 237:213-221, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.004>
- Ding Y., Y. Liu, Z. Li, X. Tan, X. Huang, G. Zeng, L. Zhou and B. Zheng (2016) Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36:36, <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
- Escalante R. A., G. Pérez L., J. Hidalgo M., J. López C., J. Campo A., E. Valtierra P. y J. D. Etchevers B. (2016) Biocarbón (biochar) I: naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34:367-382.
- George E., M. Ventura, P. Panzacchi, F. Scandellari and G. Tonon (2017) Can hydrochar and pyrochar affect nitrogen uptake and biomass allocation in poplars? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180:178-186, <https://doi.org/10.1002/jpln.201600563>
- Guiotoku M., F. A. Hansel, E. H. Novotny and C. M. B. de Freitas Maia (2012) Molecular and morphological characterization of hydrochar produced by microwave-assisted hydrothermal carbonization of cellulose. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47:687-692, <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000500008>
- Gurwick N. P., L. A. Moore, C. Kelly and P. Elias (2013) A systematic review of biochar research, with a focus on its stability *in situ* and its promise as a climate mitigation strategy. *PLoS ONE* 8:e75932, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075932>
- Hu S., J. Xiang, L. Sun, M. Xu, J. Qiu and P. Fu (2008) Characterization of char from rapid pyrolysis of rice husk. *Fuel Processing Technology* 89:1096-1105, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.001>
- Ibarrola R., B. Evar y D. Reay (2013) Comercialización de Biocarbón (Biochar) en México. Definición del Contexto para un Programa de Investigación Multidisciplinario. Universidad de Edimburgo. Edimburgo, Escocia. 24 p.
- Iqbal H., M. Garcia-Perez and M. Flury (2015) Effect of biochar on leaching of organic carbon, nitrogen, and phosphorus from compost in bioretention systems. *Science of the Total Environment* 521-522: 37-45, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.060>
- Kalderis D., M. S. Kotti, A. Méndez and G. Gascó (2014) Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of rice husk. *Solid Earth* 5:477-483, <https://doi.org/10.5194/se-5-477-2014>
- Kambo H. S. and A. Dutta (2015) A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45:359-378, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
- Lynam J. G., C. J. Coronella, W. Yan, M. T. Reza and V. R. Vasquez (2011) Acetic acid and lithium chloride effects on hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 102:6192-6199, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.035>
- Lynam J. G., M. T. Reza, V. R. Vasquez and C. J. Coronella (2012) Effect of salt addition on hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. *Fuel* 99:271-273, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.035>
- Medina O. L. E. e I. N. Medina O. (2018) Prototipo autotérmico móvil para producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana* 36:121-129, <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Onay Ö. (2014) Effects of catalyst on pyrolysis of laurel (*Laurus nobilis* L.) seed in a fixed bed tubular reactor. *Chemical Engineering Transactions* 37:127-132, <https://doi.org/10.3303/CET1437022>
- Quesada-Kimsey J. (2012) La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *Revista Tecnología en Marcha* 25:14-21, <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.465>

- Regmi P., J. L. Garcia M., S. Kumar, X. Cao, J. Mao and G. Schafran (2012) Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *Journal of Environmental Management* 109:61-69, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.047>
- Reza M. T., E. Rottler, L. Herklotz and B. Wirth (2015) Hydrothermal carbonization (HTC) of wheat straw: influence of feedwater pH prepared by acetic acid and potassium hydroxide. *Bioresource Technology* 182:336-344, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.024>
- Rodríguez A. D. y R. Grant A. (2015) La cáscara de arroz, un problema medioambiental para la ciudad de Manzanillo. Propuestas de soluciones para el desarrollo local. *Revista Eco Solar* 54:1-5.
- Rosenani A. B., S. H. Ahmad, S. Nurul Adila and T. Wei Loon (2014) Biochar as a soil amendment to improve crop yield and soil carbon sequestration. *Acta Horticulturae* 1018:203-209, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1018.20>
- SAS Institute (2004) SAS/STAT User's Guide. Release 9.1. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA. 5121 p.
- Schneider D., M. Escala, K. Supawittayayothin and N. Tippayawong (2011) Characterization of biochar from hydrothermal carbonization of bamboo. *International Journal of Energy and Environment* 2:647-652.
- Schulz H., G. Dunst and B. Glaser (2013) Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development* 33:817-827, <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0150-0>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2019) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SADER. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Marzo 2019).
- Varela M. O., E. B. Rivera, W. J. Huang, C. C. Chien and Y. M. Wang (2013) Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochars and their effect on the growth of water spinach in a field test. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13:251-266, <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000022>
- Villamagua M., L. Valarezo, C. Valarezo, C. Tandazo C. y M. Ramón (2014) Efecto de granulometrías de biocarbón sobre las condiciones físicas del suelo y tensiones de humedad en el cultivo del tomate *Solanum lycopersicum*, bajo invernadero. *Revista CEDAMAZ* 3:93-105.
- Wang S. and C. N. Mulligan (2009) Effect of natural organic matter on arsenic mobilization from mine tailings. *Journal of Hazardous Materials* 168:721-726, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.088>
- Zheng W., N. Holm and K. A. Spokas (2016) Research and application of biochar in North America. In: *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*. M. Guo, Z. He and S. M. Uchimiya (eds.). SSSA Special Publication 63. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp:475-494, <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub63.2014.0053>