



# Efecto de la revegetación con la especie nativa *Piscidia carthagenensis* Jacq. sobre la calidad del suelo en un matorral xerófito intervenido para la extracción de arena

*Effect of revegetation with the native species Piscidia carthagenensis Jacq.  
on soil quality in a xerophytic scrubland intervened for sand extraction*

DAVID SIERRAALTA<sup>1</sup>, ALICIA CÁCERES<sup>1\*</sup>, ISMAEL HERNÁNDEZ VALENCIA<sup>2</sup>,  
ROXANA GAJARDO<sup>1</sup>, KARLA CÁCERES-MAGO<sup>1</sup> Y ALEX RODRÍGUEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Biología Experimental

<sup>2</sup>Instituto de Zoología y Ecología Tropical. Facultad de Ciencias  
Universidad Central de Venezuela

\*<alicia2001@gmail.com>

## RESUMEN

La minería a cielo abierto provoca una severa degradación de los ecosistemas afectados, debido a la remoción de la vegetación y del suelo. En el marco de la restauración ecológica de este tipo de impactos en los ecosistemas áridos, las especies de leguminosas pueden tener valor especial como nodrizas para el reclutamiento de otras especies vegetales. Como parte de un programa de monitoreo de áreas restauradas que fueron previamente afectadas por la extracción de arena, nuestros resultados indicaron que los parámetros químicos, bioquímicos y microbiológicos de los suelos de un área recuperada con *Piscidia carthagenensis* (Fabaceae) mostraron una clara mejoría con relación a los valores obtenidos en el área perturbada, siendo ambos grupos de datos menores al compararlos con los obtenidos en el matorral xerófito, tomado como sistema de referencia. Estos resultados indican la importancia de utilizar especies nativas adaptadas a las condiciones climáticas imperantes en la zona, que incluya el uso de bioinsumos como las micorrizas arbusculares. También se destaca la importancia del monitoreo de estos esfuerzos de manera de evaluar el éxito del proceso de restauración.

## ABSTRACT

*Opencast sand mining causes severe ecosystem degradation due to the removal of vegetation and soil. Within the framework of the ecological restoration of this type of impacts in arid ecosystems, leguminous species can have special value as nurse plants for the recruitment of other plant species. As part of the monitoring of the restoration of areas disturbed by sand extraction, our results indicated that the chemical, biochemical and microbiological parameters in the soils of an area recovered with *Piscidia carthagenensis* (Fabaceae) inoculated with arbuscular mycorrhizas showed a clear improvement in relation to the values obtained in the disturbed area, but lower*

*when compared with those obtained in the xerophytic scrub taken as a reference. These results indicate the importance of using native species adapted to the prevailing climatic conditions in the area, which includes the use of bio-inputs such as previously inoculated arbuscular mycorrhizae. The importance of monitoring these efforts to evaluate the success of the restoration process is also highlighted.*

---

**Palabras clave:** ecosistemas áridos, leguminosas, grupos funcionales, indicadores microbiológicos

---

---

**Keywords:** arid ecosystems, legumes, functional groups, microbiological indicators

---

## INTRODUCCIÓN

Alrededor del 90% de la superficie ocupada por matorrales xerófitos en Venezuela muestra evidencias de degradación, y aproximadamente 43% del total muestra altos intervalos de intervención antrópica, por lo que se los clasifica como ecosistemas en peligro (Huber & Oliveira-Miranda, 2010). En la península de Macanao, ubicada al oeste de la isla de Margarita, la explotación de minas de arena ha producido alteraciones en los matorrales xerófitos, los cuales representan una de las comunidades vegetales de mayor complejidad y riqueza de especies de las áreas bajas de Macanao (Fajardo, 2007; González, 2007).

Este tipo de perturbación produce el deterioro de los mecanismos naturales de regeneración, y en muchos casos, la eliminación del causante del disturbio no resulta suficiente para la recuperación de estas áreas, debido principalmente al deterioro de las características estructurales, químicas, nutricionales, hídricas y microbiológicas del suelo que generan restricciones para el establecimiento, crecimiento y sobrevivencia de las plantas. Para contrarrestar estos impactos adversos es necesaria la restauración ecológica, lo cual requiere de una planificación e integración de operaciones de minería y rehabilitación, basadas en el

conocimiento de principios ecológicos y fisiológicos de especies nativas seleccionadas (Ceccon, 2013; Tezara et al., 2014; Pérez, et al., 2019, 2020).

El proceso de restauración se logra, entre otras cosas, con la revegetación del ecosistema, y se toma como un criterio importante la selección de especies que actúen como “islas de recursos” o “plantas nodrizas” (Padilla & Pugnaire, 2006). El nodricismo se refiere al mecanismo en el cual algunas plantas poseen adaptaciones que les permiten establecerse en ambientes muy estresantes y modifican el microhábitat que ocupan, para facilitar el desarrollo de otras especies que suelen estar adaptadas a ambientes menos estresantes y, por este motivo, necesitan de la presencia de nodrizas para reducir la severidad del microhábitat y favorecer su establecimiento (Navarro-Cano et al., 2019). Diferentes estudios han validado la importancia de considerar el nodricismo con plantas que poseen la doble simbiosis (micorrizas y rizobios), ya que la suma de todos los efectos beneficiosos de la simbiosis tripartita facilita el reclutamiento de nuevos individuos de las especies vegetales típicas de la comunidad. De esta forma se aceleran los procesos de sucesión vegetal a condiciones de mayor estabilidad con una composición más diversa, tanto vegetal como microbiológica (Caravaca et al., 2005; Navarro-Cano et al., 2019).

La pérdida de vegetación en los procesos de deforestación trae consigo una reducción de la actividad microbiológica del suelo, dado que los microorganismos presentan una elevada sensibilidad a disturbios antropogénicos y que responden a escalas de tiempo mucho más cortas en comparación con aquellos físicos o químicos, lo que los convierten en indicadores ideales de la calidad del suelo (Molina-Montenegro et al., 2016). Dentro de estos microorganismos cabe destacar la simbiosis con los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), los cuales tienen un papel importante en la mejora de los atributos fisiológicos y morfológicos de las plantas, a través de la simbiosis que se establece con sus raíces. Adicionalmente, otros estudios han encontrado una alta frecuencia de colonización en las especies vegetales del matorral xerófito y parcelas sucesionales de la zona (Cáceres & Kalinhoff, 2014). La presencia de esta simbiosis está asociada a interacciones con otros microorganismos en la rizósfera de las plantas, lo que produce un efecto sinérgico importante en los procesos de mineralización de nutrientes del suelo (Azcón-Aguilar & Barea, 2015).

En la Arenera La Chica, en la península de Macanao, se han llevado a cabo diversos estudios como parte de proyectos de restauración de estas áreas degradadas por la extracción de arena, pero la evaluación de los mismos ha sido efectuada solo a corto plazo (Fajardo et al., 2007; Cáceres-Mago, 2012). Se considera que el monitoreo en el tiempo es fundamental, para lo cual se deben seleccionar indicadores que permitan evaluar el desempeño o consecución de los objetivos ambientales propuestos (Cuevas et al., 2019).

En base a lo anteriormente expuesto, retomamos el trabajo de Kalinhoff

(2012), quien al revegetar con *Piscidia carthagenensis* (Fabaceae), demostró la importancia de realizar una selección de HMA nativos que incrementen el desarrollo y sobrevivencia de la especie una vez trasplantada a campo, en comparación con plantas no inoculadas. A partir de este trabajo y después de 8 años de revegetar la zona, planteamos como objetivo evaluar los indicadores de calidad del suelo en áreas perturbadas y restauradas, con el fin de establecer: a) el impacto de la actividad minera y b) su eventual recuperación con las labores de restauración. Para ello se parte de las hipótesis de que con la perturbación del ecosistema se reduce la calidad del suelo, y esta a su vez mejora con la restauración con *P. carthagenensis* inoculada con micorrizas arbusculares.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la Arenera La Chica, una mina de arena a cielo abierto ubicada en la península de Macanao, al occidente de la isla de Margarita (10°56' - 11°06' N; 64°10' - 64°25' O), estado Nueva Esparta, Venezuela. Para el estudio se seleccionaron tres localidades dentro del área de la mina: 1) **AR**: un área con 8 años de recuperación luego de haber sido revegetada con la siembra de 165 plantas de *Piscidia carthagenensis* (Fabaceae), crecidas en un vivero durante 5 meses, sometidas a diferentes combinaciones de suelo-inóculo nativo de HMA (Kalinhoff, 2012); 2) **AP**: un área perturbada por la extracción de arena y luego abandonada durante aproximadamente 3 años; y 3) **MX**: un matorral xerófito, como sitio de referencia. Los suelos del área de estudio se caracterizaron por ser

franco-arcillo-arenosos (MX) y franco-arenosos (AR y AP). Las especies vegetales más representativas en el área de estudio fueron *Stenocereus griseus*, *Bromelia* sp. y *Opuntia wentiana* en MX; *Piscidia carthagenensis*, *Bastardia viscosa* y *Cenchrus ciliaris* en AR, y *Melinis repens*, *Cloris inflata* y *Sesbania sericea* en AP (mayores detalles sobre la composición florística, en Sierraalta, 2019).

### **Recolección de las muestras de suelo**

Para la evaluación de la calidad del suelo y presencia de HMA se recolectaron muestras en cada localidad (AR, AP y MX), estableciendo tres subparcelas de 50 x 20 m (una en cada localidad). En cada subparcela se tomaron aleatoriamente 25 porciones de suelo a una profundidad de 0-10 cm, las cuales fueron mezcladas homogéneamente, para finalmente obtener tres muestras compuestas por cada localidad en estudio. Para la determinación de las abundancias de los grupos funcionales de microorganismos edáficos (GFME) se descartó la capa superficial del suelo y se tomaron las muestras bajo condiciones estériles, sin superar los 5 cm de profundidad. Las muestras colectadas se mantuvieron a 4 °C hasta su procesamiento en el laboratorio.

### **Evaluación de indicadores físicos, químicos, microbiológicos y bioquímicos de la calidad del suelo**

La capacidad de campo (CC) fue el único indicador físico evaluado, mientras que entre los químicos se consideraron el pH, C orgánico (CO), N total (NT) y P disponible (Pdis) (Anderson & Ingram, 1992). Entre los indicadores microbio-

lógicos y bioquímicos de la calidad del suelo se evaluaron la respiración basal (RB), biomasa de C microbiano (Cmic), actividad de la enzima deshidrogenasa (ADH) y actividad de la fosfatasa ácida (AFA) (Paolini, 2011).

### **Determinación de la abundancia de microorganismos edáficos pertenecientes a diferentes grupos funcionales**

Se determinó la abundancia de las bacterias solubilizadoras de fosfato (BSP) sembradas en agar YED-P (Lizarazo-Medina & Gómez-Vásquez, 2015), bacterias celulolíticas (BC) en agar celulosa (Milian et al., 2009), bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) en agar Ashby-sacarosa (Becking, 2006), mediante el recuento de las unidades formadoras de colonias por gramo de suelo (UFC.g<sup>-1</sup>). Por su parte, la abundancia de las bacterias nitrificantes (BN) fue determinada por el número más probable en caldo peptonado y revelada con difenilamida sulfúrica (Eaton et al., 2005).

### **Evaluación de parámetros micorrízicos**

La ocurrencia y el porcentaje de colonización de HMA (CMA) se determinó a través de la tinción de raíces, según Phillips & Hayman (1970). Las raíces teñidas fueron evaluadas según McGonigle et al. (1990). Se realizó la extracción y cuantificación del contenido de glomalina total (GT) y glomalina fácilmente extraíble (GFE) en el suelo según Wright & Upadhyaya (1996).

### **Análisis de los datos**

Para la evaluación estadística de los resultados se aplicó la prueba de Kruskal-

Wallis, dado que los datos no presentaron normalidad ni homocedasticidad (Hammer et al., 2001). Para generar el heatmap, las variables fueron centradas y escaladas con la desviación estándar a través del lenguaje R (R Core Team, 2020) con los paquetes “dplyr” (Wickham et al., 2020) y “gplots” (Warnes et al., 2020).

## RESULTADOS

El suelo del MX presentó una mayor CC que los demás suelos, lo cual se asocia con el mayor contenido de CO y una textura franco-arcillosa, en relación al franco-arenoso que presentan el AR y AP. Entre estos dos últimos no se observaron diferencias significativas en la CC (**Tabla 1**).

El pH del suelo en AP fue de 6,53, el de MX de 6,70 y el del AR de 7,12. El conte-

nido de CO en MX resultó ser 1,6 veces mayor al encontrado en AR, mientras que los valores de CO en AP resultaron ser los más bajos (**Tabla 1**).

El NT presentó el mayor valor en el MX seguido del AR el cual fue 1,4 veces mayor que en AP. Por su parte, la mayor disponibilidad de P se encuentra en MX, con valores 2,36 y 1,13 veces mayores que el AP y AR, respectivamente. Para todas las localidades, los contenidos de NT y Pdis son bajos (**Tabla 1**).

El MX presentó los mayores valores en las variables RB y Cmic seguido del AR y los menores valores en AP, probablemente producto de la menor entrada de carbono al sistema. Igualmente, ADH y AFA presentaron la misma tendencia que las variables microbiológicas, en cuanto a una mayor actividad en MX, seguido del AR y finalmente AP, que presentó los menores valores (**Tabla 2**).

**Tabla 1.** Indicadores físicos y químicos de calidad del suelo de tres localidades ubicadas en la Arenera La Chica: MX: Matorral xerófito de referencia; AR: Área recuperada; AP: Área perturbada. CC: Capacidad de campo. CO: Carbono orgánico. NT: Nitrógeno total. Pdisp: Fósforo disponible. Se presentan los valores medios  $\pm$  error estándar ( $n=3$ ). Letras diferentes indican diferencias significativas entre columnas (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ )

*Table 1. Physical and chemical indicators of soil quality of three locations in the Arenera La Chica: MX: Xerophytic scrub of reference; AR: Recovered area; AP: Disturbed area. CC: Field capacity. CO: Organic carbon. NT: Total nitrogen. Pdisp: Available phosphorus. Mean values  $\pm$  standard error are presented ( $n=3$ ). Different letters indicate significant differences between columns (Kruskal-Wallis,  $p < 0.05$ )*

Indicadores físicos y químicos	Localidad		
	MX	AR	AP
CC (gH <sub>2</sub> O.g <sup>-1</sup> )	0,59 $\pm$ 0,03 a	0,41 $\pm$ 0,02 b	0,36 $\pm$ 0,06 b
pH	6,70 $\pm$ 0,01 a	7,12 $\pm$ 0,05 b	6,53 $\pm$ 0,02 c
CO (%)	4,11 $\pm$ 0,09 a	2,54 $\pm$ 0,06 b	1,26 $\pm$ 0,03 c
NT	0,38 $\pm$ 0,03 a	0,19 $\pm$ 0,01 b	0,13 $\pm$ 0,01 c
Pdisp (ppm)	1,37 $\pm$ 0,12 a	1,22 $\pm$ 0,02 b	0,58 $\pm$ 0,05 c

**Tabla 2.** Indicadores microbiológicos de la calidad del suelo de tres localidades ubicadas en la Arenera La Chica: MX: Matorral xerófito de referencia; AR: Área recuperada; AP: Área perturbada. RB: Respiración basal. Cmic: Carbono microbiano. ADH: Deshidrogenasa. AFA: Fosfatasa ácida. Se presentan los valores medios  $\pm$  error estándar ( $n=3$ ). Letras diferentes indican diferencias significativas entre columnas (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ )

*Table 2. Microbiological indicators of soil quality of three locations in the Arenera La Chica: MX: Xerophytic scrub of reference; AR: Recovered area; AP: Disturbed area. RB: Basal respiration. Cmic: Microbial carbon. ADH: Dehydrogenase. AFA: Acid phosphatase. Mean values  $\pm$  standard error are presented ( $n=3$ ). Different letters indicate significant differences between columns (Kruskal-Wallis,  $p < 0.05$ )*

Indicador microbiológico	Localidad		
	MX	AR	AP
RB (mg C-CO <sub>2</sub> .kg <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )	0,54 $\pm$ 0,10 a	0,13 $\pm$ 0,09 b	0,03 $\pm$ 0,01 c
Cmic (mg C.g <sup>-1</sup> )	0,84 $\pm$ 0,12 a	0,58 $\pm$ 0,06 b	0,33 $\pm$ 0,04 c
ADH ( $\mu$ mol TPF.g <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )	6,49 $\pm$ 0,74 a	3,69 $\pm$ 0,64 b	2,95 $\pm$ 0,28 c
AFA ( $\mu$ g PNP.g <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )	6,32 $\pm$ 0,24 a	3,22 $\pm$ 0,46 b	0,74 $\pm$ 0,42 c

Por su parte, los microorganismos pertenecientes a los grupos funcionales BSP, BFN y BC mostraron abundancias significativamente mayores en MX, seguida del AR y por último AP (**Tabla 3**). La abundancia de las BSP en el MX fue el doble de abundancia de la AR y esta última 4 veces más que el AP. Las BFN del MX fueron 1,5 veces mayor que las del AR. El AP presentó un valor mucho menor de abundancia de este grupo que las otras dos áreas, siendo casi 12 veces menor que la del AR. La abundancia de las BC fue 1,5 veces mayor en MX con respecto a la AR, mientras que en esta última fue 6 veces mayor que AP, siendo el título promedio de AP hasta un orden de magnitud menor que la abundancia en el MX. Lo contrario ocurrió con la abundancia de las BN donde el mayor valor se encontró en AR, con casi el doble de abundancia del MX y por último, valores bajos en AP (**Tabla 3**).

Respecto a las variables micorrízicas, la CMA fue significativamente mayor en el AR que en MX, mientras que los menores valores de CMA fueron observados en AP. En cuanto al contenido de GFE y GT se observó una disminución significativa en el AP en comparación con las otras localidades, encontrando valores por debajo del método de detección en la GFE. El MX y el AR presentaron diferencias significativas entre sí, siendo los mayores valores en el MX, seguido por AR (**Tabla 4**).

El heatmap mostró las correlaciones entre las variables estudiadas de calidad del suelo y GFME (**Figura 1**), permitiendo que las tres áreas de estudios (MX, AR y AP) se distinguieran claramente en el eje horizontal. Los resultados se pueden dividir en dos grupos de variables que se diferencian notablemente. En primer lugar, las variables pH, BN y CMA se correlacionan significativamente y se

**Tabla 3.** Abundancia de grupos funcionales identificados a partir de muestras de suelos provenientes de tres localidades ubicadas en la Arenera La Chica: MX: Matorral xerófito de referencia; AR: Área recuperada; AP: Área perturbada. BSP: Bacterias solubilizadoras de fósforo. BFN: Bacterias fijadoras de nitrógeno. BC: Bacterias celulolíticas. BN: Bacterias nitrificantes. UFC.g<sup>-1</sup>: Unidades formadoras de colonias por gramo de suelo. NMP.g<sup>-1</sup>: Número más probable por gramo de suelo. Se presentan los valores medios ± error estándar (n=4). Letras diferentes indican diferencias significativas entre columnas (Kruskal-Wallis, p< 0,05)

*Table 3. Abundance of functional groups identified from soil of three locations in the Arenera La Chica: MX: Xerophytic scrub of reference; AR: Recovered area; AP: Disturbed area. BSP: Phosphorus solubilizing bacteria. BFN: Nitrogen-fixing bacteria. BC: Cellulolytic bacteria. BN: Nitrifying bacteria. CFU.g<sup>-1</sup>: Colony-forming units per gram of soil. NMP.g<sup>-1</sup>: Most probable number per gram of soil. Mean values ± standard error are presented (n=4). Different letters indicate significant differences between columns (Kruskal-Wallis, p< 0.05)*

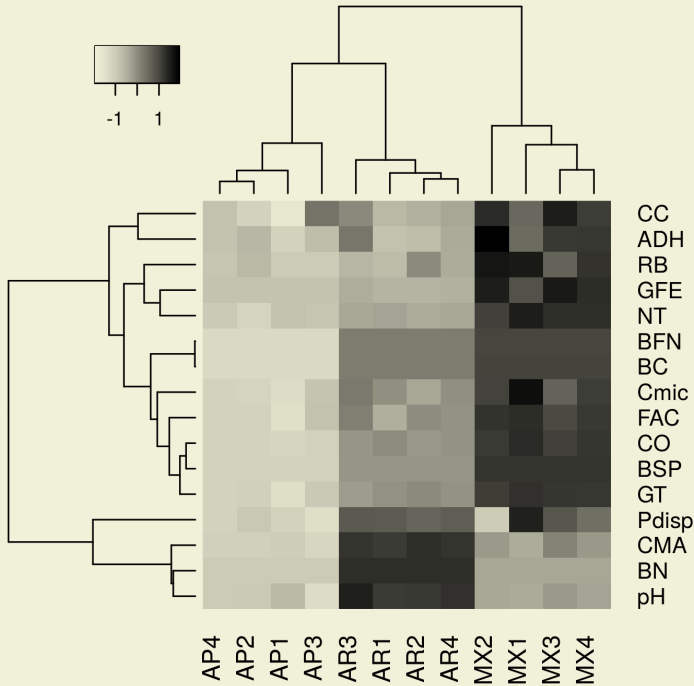
Grupo funcional	Localidad		
	MX	AR	AP
BSP (UFC.g <sup>-1</sup> )	6,65E+05 ± 8,37E+04 a	2,28E+05 ± 5,02E+04 b	8,12E+04 ± 1,60E+04 c
BFN (UFC.g <sup>-1</sup> )	3,84E+05 ± 5,36E+04 a	2,58E+05 ± 5,61E+04 b	2,20E+04 ± 4,59E+03 c
BC (UFC.g <sup>-1</sup> )	6,18E+05 ± 8,98E+04 a	4,23E+05 ± 6,21E+04 b	6,43E+04 ± 1,34E+04 c
BN (NMP.g <sup>-1</sup> )	2380 ± 1814,55229 a	8792,5 ± 2448,30817 b	5 ± 5 c

**Tabla 4.** Parámetros micorrízicos evaluados en los suelos de tres localidades de la Arenera La Chica: MX: Matorral xerófito de referencia; AR: Área recuperada; AP: Área perturbada. CMA: Porcentaje de colonización de micorrizas arbusculares. GFE: Glomalina fácilmente extraíble. GT: Glomalina total. Se presentan los valores medios ± error estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencias significativas entre columnas (Kruskal-Wallis, p< 0,05)

*Table 4. Mycorrhizal parameters evaluated in the soils of three locations in the Arenera La Chica: MX: Xerophytic scrub of reference; AR: Recovered area; AP: Disturbed area. CMA: Percentage of colonization of arbuscular mycorrhizae. GFE: Easily extractable glomalin. GT: Total glomalin. Mean values ± standard error are presented (n=3). Different letters indicate significant differences between columns (Kruskal-Wallis, p< 0.05)*

Parámetros micorrízicos	Localidad		
	MX	AR	AP
CMA (%)	54,80 ± 1,40 a	81,37 ± 1,66 b	36,80 ± 2,08 c
GFE (mg.g <sup>-1</sup> suelo)	1,09 ± 0,11 a	0,17 ± 0,02 b	0*
GT (mg.g <sup>-1</sup> suelo)	9,94 ± 0,05 a	8,46 ± 0,08 b	7,30 ± 0,07 c

\*Valor por debajo del método de detección



**Figura 1.** Análisis de agrupamiento jerárquico y mapa de calor (heatmap) con base en las variables de calidad de suelo y abundancia de grupos funcionales de microorganismos edáficos (GFME). Las muestras fueron agrupadas con base en la similaridad con las otras y los agrupamientos resultantes son arreglados horizontalmente de acuerdo a los agrupamientos de correlación entre las variables. En la figura, tonos oscuros representan valores altos y tonos claros representan valores bajos para la variable evaluada. MX: Matorral xerófito de referencia; AR: Área recuperada; AP: Área perturbada. CC: Capacidad de campo. ADH: Actividad deshidrogenasa. RB: Respiración basal. GFE: Glomalina fácilmente extraíble. NT: Nitrógeno total. BFN: Bacterias fijadoras de nitrógeno. BC: Bacterias celulolíticas. Cmic: Carbono microbiano. FAC: Fosfatasa ácida del suelo. CO: Carbono orgánico. BSP: Bacterias solubilizadoras de fósforo. GT: Glomalina total. Pdisp: Fósforo disponible. CMA: Porcentaje de colonización de micorrizas arbusculares. BN: Bacterias nitrificantes. pH: Concentración de iones hidrógeno

*Figure 1. Hierarchical grouping analysis and heatmap based on soil quality variables and abundance of functional groups of edaphic microorganisms (FGEM). The samples were grouped based on similarity with the others and the resulting groupings are arranged horizontally according to the correlation groupings between the variables. In the figure, dark tones represent high values and light tones represent low values for the evaluated variable. MX: Xerophytic scrub of reference; AR: Recovered area; AP: Disturbed area. CC: Field capacity. ADH: Dehydrogenase activity. RB: Basal respiration. GFE: Easily removable glomalin. NT: Total nitrogen. BFN: Nitrogen-fixing bacteria. BC: Cellulolytic bacteria. Cmic: Microbial carbon. FAC: Soil acid phosphatase. CO: Organic carbon. BSP: Phosphorus solubilizing bacteria. GT: Total glomalin. Pdisp: Available phosphorus. CMA: Percentage of colonization of arbuscular mycorrhizae. BN: Nitrifying bacteria. pH: Concentration of hydrogen ions*



separan del resto de las variables estudiadas. Las mismas fueron significativamente más altas en el AR que en MX. El resto de las variables se congregaron en otro gran grupo donde sus valores son más altos en el MX que en AR. Todos los parámetros evaluados revelaron valores bajos en el AP.

## DISCUSIÓN

El estudio de las variables en el MX proporcionó la información referencial de calidad del suelo que debe alcanzarse en las labores de restauración, mientras que la comparación de estas variables entre AP y MX permite valorar el impacto de la perturbación. Los indicadores químicos demostraron que en AP disminuye el pH, CO, Pdis y NT comparado con MX, hecho que está asociado a la remoción del suelo y la vegetación. Bajo estas condiciones el bajo aporte de materia orgánica y su consecuente descomposición está determinada por la actividad de la microbiota edáfica y de algunas propiedades del suelo (textura, pH, temperatura, humedad, entre otras) que afecten dicha actividad (Mohammadi et al., 2011). En contraste, estos parámetros incrementan en AR respecto a AP, debido a las labores de revegetación con *P. carthagenensis* que procuran una mejora en la fertilidad del suelo. Se ha demostrado que la diversidad y actividad de comunidades microbianas durante la revegetación influyen directamente sobre las variables químicas del suelo como el CO, N y P, debido a su papel crucial en el ciclado de nutrientes y a la descomposición de la materia orgánica (Fterich et al., 2014; Li et al., 2015), de allí que una reducida actividad microbiana podría estar asociada a la baja disponibilidad de recur-

sos (CO, calidad de la materia orgánica, y exudados radicales entre otros) y a la capacidad de estos microorganismos de utilizarlos. En el caso de AP, la baja concentración de CO afecta directamente la actividad microbiana dado que este elemento resulta esencial por ser la fuente de energía necesaria para que todos los grupos microbianos se desarrollen como sistemas autocatalíticos (Matsumoto et al., 2005; Bastidas et al., 2006).

Los menores valores de los parámetros microbiológicos (RB, Cmic) encontrados en el AP en comparación al MX y al AR, podrían ser producto de una serie de eventos concatenados que incluyen la baja cobertura vegetal que disminuye el hábitat de los microorganismos edáficos asociados a la rizósfera de las plantas, y por consiguiente, todos los procesos que impliquen actividad microbiana y descomposición de la materia orgánica. En concordancia con nuestros resultados, Deng et al. (2018), señalan la importancia de tomar en cuenta que estos indicadores pueden variar ampliamente con el tiempo de recuperación de las áreas perturbadas, con el tipo de vegetación (sucesión natural o asistida) que se establezca y con la cantidad y calidad de la materia orgánica producida.

La AFA y ADH fueron altas en el MX y el AR, al compararlas con el AP. Ello evidencia una mejora significativa en la recuperación de la funcionalidad del sistema, referido a la alta relación que existe en el aumento de la entrada de compuestos orgánicos-actividad microbiana-síntesis enzimática (An et al., 2009). La mayor ADH en el AR y MX, refleja una mayor capacidad oxidativa sobre la materia orgánica, producto del incremento en la actividad microbiana (RB), mientras que en el AP la remoción de la capa

vegetal produce alteraciones en la microbiota edáfica y por consiguiente en la actividad de las enzimas (Li et al., 2015). Por su parte, la AFA como un indicador importante de los cambios en fertilidad del suelo por su relación con los procesos de mineralización de P, presentó el mismo comportamiento que la ADH, lo que confirma la relación existente entre las variables químicas y bioquímicas. Resultados similares muestran que existe un mejoramiento de la calidad de suelo como consecuencia de la revegetación, y encuentran una mayor actividad enzimática al compararlo con suelos perturbados (Bastidas et al., 2006; Deng et al., 2018).

En cuanto a las variables micorrízicas evaluadas, se observó que tanto la CMA como los valores de glomalina (GT y GFE) del MX y el AR fueron mayores que en el AP. Estos resultados indican que los valores de GT y GFE están determinados por la presencia de los HMA y por la composición de las comunidades vegetales (Singh et al., 2017). Igualmente, los contenidos de CO están asociados a los contenidos de glomalina, debido a la contribución de esta glicoproteína en la formación de agregados del suelo, que protege a los compuestos lábiles de la descomposición y por lo tanto incrementa el secuestro de carbono en el suelo (Vasconcellos et al., 2013; Singh et al., 2017).

La abundancia de los GFME en las tres áreas evaluadas mostró una recuperación de la microbiota edáfica en el AR. Este resultado podría indicar que inicialmente el proceso de revegetación con *Piscidia carthaginensis* habría afectado el crecimiento, composición y actividad de los microorganismos como consecuencia de los cambios en la exudación

de compuestos carbonados en las plantas micorrizadas y nutrientes en el suelo (Williams & De Vries, 2020). Además, es importante considerar que la composición y estructura de las comunidades bacterianas en ecosistemas semiáridos no solamente genera un entramado de interacciones que afectan el desempeño de las plantas y la calidad del suelo, sino que también inciden sobre la formación y funcionalidad de los HMA (Barea et al., 2011; Bi et al., 2020). Por ejemplo, en el MX y AR la mayor abundancia de BSP y de CMA podría indicar que existe una estrecha relación entre las bacterias y los HMA. Esta sinergia se basa en que las bacterias solubilizan el P de fuentes no disponibles para las plantas, y el hongo lo incorpora a la planta debido a la alta afinidad de las hifas por el P disponible (Azcón & Barea, 2015). Por su parte, la presencia de BFN puede producir un incremento en los niveles de micorrización y por ende, se podría estar favoreciendo el desarrollo vegetal en el AR, donde los valores de BFN resultaron mayores respecto al AP (Aseri et al., 2008).

En cuanto a la abundancia de BC, se ha señalado que los HMA producen un estímulo indirecto, a través del crecimiento radical y consiguiente aumento en la cantidad de celulosa, que podría estar activando a bacterias con la capacidad enzimática para degradar polímeros de mayor complejidad química, como es el caso de la celulosa (Veresoglou et al., 2011; Li et al., 2015). La menor abundancia de BN en el MX en comparación con el AR, podría estar indicando que la disponibilidad de CO del suelo favorece la inmovilización del N y decrece la nitrificación por un efecto negativo sobre la disponibilidad de amonio para las comunidades nitrificantes, además las comu-

nidades nitrificantes no están limitadas por C disponible, debido a que obtienen energía por la oxidación del amonio y no del C orgánico (Montaño et al., 2013).

Los resultados destacan el efecto negativo de la minería de extracción de arena sobre la composición de las poblaciones de los GFME en el AP, ya que se acentuó la baja disponibilidad de nutrientes y el aumento de las condiciones ambientales adversas, producto de los procesos de deforestación provocados por esta actividad antropogénica.

En general, el heatmap muestra un impacto positivo y significativo de la revegetación con *P. carthagenensis* en la estructura de la comunidad microbiana y en la calidad del suelo, al haber correlaciones significativas entre ellas en el AR, lo que podría indicar una mejora ecológica regulada entre los procesos bióticos y abióticos del suelo a lo largo de la restauración de un área perturbada.

## CONCLUSIONES

De los resultados se deriva que la perturbación del ecosistema por la extracción de arena produjo una disminución de la calidad del suelo, debido a la deforestación y remoción de las capas superficiales del suelo. Por otra parte, luego de 8 años, el establecimiento de *P. carthagenensis* mejoró las características químicas, bioquímicas y microbiológicas del suelo. Aunque las mismas no se equiparan a las del matorral xerófito de referencia, es un inicio de recuperación de las áreas degradadas por la actividad minera. En este sentido, se recomienda llevar a cabo más evaluaciones en el tiempo, que permitan continuar con el monitoreo a largo plazo y establecer si se alcanzan las metas de restauración de la calidad del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- AN, S., Y. HUANG & F. ZHENG, 2009. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China. *Applied Soil Ecology* 41(3): 286-292.
- ANDERSON, J. & J. INGRAM, 1992. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. Oxford: C.A.B. International. 272 pp.
- ASERI, G., N. JAIN, J. PANWAR, A. RAO & P. MEGHWAL, 2008. Biofertilizers improve plant growth, fruit yield, nutrition, metabolism and rhizosphere enzyme activities of pomegranate (*Punica granatum* L.) in Indian Thar Desert. *Scientia Horticulturae* 117(2): 130-135.
- AZCÓN-AGUILAR, C. & J. BAREA, 2015. Nutrient cycling in the mycorrhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 15(2): 372-396.
- BAREA, J., J. PALENZUELA, P. CORNEJO, I. SÁNCHEZ-CASTRO, C. NAVARRO-FERNÁNDEZ, A. LOPÉZ-GARCÍA & C. AZCÓN-AGUILAR, 2011. Ecological and functional roles of mycorrhizas in semi-arid ecosystems of Southeast Spain. *Journal of Arid Environments* 75(12): 1292-1301.
- BASTIDA, F., J. MORENO, T. HERNÁNDEZ & C. GARCÍA, 2006. Microbiological activity in a soil 15 years after its revegetation. *Soil Biology and Biochemistry* 38(8): 2503-2507.
- BECKING, J., 2006. The family Azotobacteraceae. En: Dworkin, M. & S. Falkow (Eds.). *The Prokaryotes: a handbook on the biology of bacteria*. Springer, Nueva York, USA.
- BI, Y., L. XIAO, C. GUO & P. CHRISTIE, 2020. Revegetation type drives rhizosphere arbuscular mycorrhizal fungi and soil organic carbon fractions in the mining subsidence area of northwest China. *Catena* 195: 104791.
- CÁCERES, A. & C. KALINHOFF, 2014. Efecto de la perturbación producida por

- la extracción de arena sobre las micorizas arbusculares (MA) en un bosque seco tropical. *Experimentia* 4: 41-46.
- CÁCERES-MAGO, K., 2012. Respuesta a las micorizas arbusculares del virote (*Caesalpinia mollis* (H.B.K) Spreng) árbol vulnerable de un matorral xerófito en la península de Macanao, estado Nueva Esparta. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.
- CARAVACA, F., M. ALGUACIL, J. BAREA & A. ROLDÁN, 2005. Survival of inocula and native AM fungi species associated with shrubs in a degraded Mediterranean ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* 37(2): 227-233.
- CECCON, E., 2013. Restauración en bosques tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. México: UNAM-Ediciones Díaz de Santos. 285 pp.
- CUEVAS, R., J. PALÁ & M. DE BLAS, 2019. Protocolo de seguimiento para proyectos de restauración forestal. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 45(2): 87-106.
- DENG, J., Y. YIN, W. ZHU & Y. ZHOU, 2018. Variations in soil bacterial community diversity and structures among different revegetation types in the Baishilazi Nature Reserve. *Frontiers in Microbiology* 9: 2874.
- EATON, A., L. CLESCERI, E. RICE, A. GREENBERG & M. FRANSON, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: American Public Health Association.
- FAJARDO, L., 2007. Bases ecológicas para la restauración de bosques secos tropicales de la Península de Macanao, Isla de Margarita. Tesis Doctoral, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas.
- FTERICH, A., M. MAHDHI & M. MARS, 2014. The effects of *Acacia tortilis* subsp. *raddiana*, soil texture and soil depth on soil microbial and biochemical characteristics in arid zones of Tunisia. *Land Degradation & Development* 25(2): 143-152.
- GONZÁLEZ, V., 2007. La vegetación de la Isla de Margarita y sus interrelaciones con el ambiente físico. Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales 167: 131-161.
- HAMMER, O., D. HARPER & P. RYAN, 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 1-9.
- HUBER, O. & M. OLIVEIRA-MIRANDA, 2010. Ambientes terrestres de Venezuela. En: Rodríguez J., F. Rojas-Suárez & D. Giraldo Hernández (Eds.). Libro Rojo de los Ecosistemas Terrestres de Venezuela. PROVITA-Lenovo-Shell: Caracas, Venezuela.
- KALINHOFF, C., 2012. Influencia de las micorizas arbusculares sobre el crecimiento y respuesta a la sequía de *Piscidia carthagenensis* Jacq.: Implicaciones en la recuperación de un bosque seco de la península de Macanao, Isla de Margarita. Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela.
- LI, X., L. HUANG, P. BOND, Y. LU & S. VINK, 2014. Bacterial diversity in response to direct revegetation in the Pb-Zn-Cu tailings under subtropical and semi-arid conditions. *Ecological Engineering* 68: 233-240.
- LI, J., X. ZHOU, J. YAN, H. LI & J. HE, 2015. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site. *Applied Soil Ecology* 87: 56-62.
- LIZARAZO-MEDINA, P. & D. GÓMEZ-VÁSQUEZ, 2015. Microbiota rizosférica de *Espeletia* spp. de los páramos de Santa Inés y de Frontino-Urrao en Antioquia, Colombia. *Acta Biológica Colombiana* 20: 175-182.
- MATSUMOTO, L., A. MARTINES, M. AVANZI, U. ALBINO, C. BRASIL, D. SARIDAKIS & G. ANDRADE, 2005. Interactions among functional groups in the cycling of carbon, nitrogen and phosphorus in the rhizosphere of three successional species of tropical woody trees. *Applied Soil Ecology* 28(1): 57-65.

- MCGONIGLE, T., M. MILLER, D. EVANS, G. FAIRCHILD & J. SWAN, 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 115(3): 495-501.
- MILLAN, G., M. PÉREZ & R. BOCOURT, 2009. Probiotic from *Bacillus* spp and their spores in the poultry production. *Cuban Journal of Agricultural Science* 42: 117-122.
- MOHAMMADI, K., G. HEIDARI, S. KHALESRO, & Y. SOHRABI, 2011. Soil management, microorganisms and organic matter interactions: A review. *African Journal of Biotechnology* 10(86): 19840-19849.
- MOLINA-MONTENEGRO, M., R. OSES, C. ATALA, C. TORRES-DÍAZ, G. BOLA-DOS & P. LEÓN-LOBOS, 2016. Nurse effect and soil microorganisms are key to improve the establishment of native plants in a semiarid community. *Journal of Arid Environments* 126: 54-61.
- MONTAÑO, N., A. SANDOVAL, M. NAVA, J. SÁNCHEZ & F. GARCÍA, 2013. Variación espacial y estacional de grupos funcionales de bacterias cultivables del suelo de un bosque tropical seco en México. *Revista de Biología Tropical* 61(1): 439-453.
- NAVARRO-CANO, J., B. HORNER, M. GOBERNA & M. VERDÚ, 2019. Additive effects of nurse and facilitated plants on ecosystem functions. *Journal of Ecology* 107(6): 2587-2597.
- PADILLA, F. & F. PUGNAIRE, 2006. The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4(4): 196-202.
- PAOLINI, J., 2011. Modificación de metodologías de enzimas del suelo. Mimeografiado. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. 85 pp.
- PÉREZ, D.R., F.M. FARINACCIO & J. ARONSON, (2019). Towards a dryland framework species approach. Research in progress in the Monte Austral of Argentina. *Journal of Arid Environments* 161: 1-10.
- PÉREZ, D.R., C. PILUSTRELLI, F. FARINACCIO, G. SABINO & J. ARONSON, (2020). Evaluating success of various restorative interventions through drone- and field-collected data, using six putative framework species in Argentinian Patagonia. *Restoration Ecology* 28: A44-A53
- PHILLIPS, J. & D. HAYMAN, 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55(1): 158-161.
- R CORE TEAM, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- SIERRAALTA, D., 2019. Calidad de suelo, micotrofia y composición florística en áreas afectadas por la extracción de arena en la Península de Macanao, Estado Nueva Esparta. Escuela de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela.
- SINGH, A., A. RAI, V. PANDEY & N. SINGH, 2017. Contribution of glomalin to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics. *Journal of Environmental Management* 192: 142-149.
- TEZARA, W., C. KALINHOFF, O. MARÍN & A. CÁCERES, 2014. Efecto de las micorrizas arbusculares sobre las limitaciones estomáticas y no-estomáticas de la fotosíntesis de *Piscidia carthagenensis* creciendo en un suelo degradado de un matorral xerofítico tropical. *Experimentia* 4: 69-74.
- VASCONCELLOS, R., J. BONFIM, D. BARRETTA & E. CARDOSO, 2013. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein as potential indicators of soil quality in a recuperation gradient

- of the Atlantic forest in Brazil. *Land Degradation & Development* 27(2): 325-334.
- VERESOGLOU, S., R. SEN, A. MAMOLOS & D. VERESOGLOU, 2011. Plant species identity and arbuscular mycorrhizal status modulate potential nitrification rates in nitrogen-limited grassland soils. *Journal of Ecology* 99(6): 1339-1349.
- WARNES, G., B. BOLKER, L. BONEBAKKER, R. GENTLEMAN, W. HUBER, A. LIAW, T. LUMLEY, M. MAECHLER, A. MAGNUSSON, S. MOELLER, M. SCHWARTZ & B. VENABLES, 2020. *gplots: Various R Programming Tools for Plotting Data*. R package version 3.0.4. <https://CRAN.R-project.org/package=gplots>.
- WICKHAM, H., R. FRANÇOIS, L. HENRY & K. MÜLLER, 2020. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.0.1. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.
- WILLIAMS, A., & F. DE VRIES, 2020. Plant root exudation under drought: implications for ecosystem functioning. *New Phytologist* 225(5): 1899-1905.
- WRIGHT, S. & A. UPADHYAYA, 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science* 161(9): 575-586.

Recibido: 06/2020  
Aceptado: 01/2021