

Contribución de bacterias endófitas nativas en la acumulación de nutrientes en poaceas altoandinas

Contribution of native endophytic bacteria in nutrients accumulation in high Andean poacea

Nery Santillana Villanueva^{1*}, Alex Tineo Bermudez¹, Godofredo Mamani Mamani², Michael Aylas Chavez¹, Wilfredo Gonzales Guzman¹, Francisco Espinoza-Montes³

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la contribución de las bacterias endófitas nativas en la acumulación de nutrientes en tres poaceas altoandinas a 4116 msnm. Se determinó el contenido de macro y micronutrientes en la biomasa aérea de *Calamagrostis vicunarum*, *Festuca dolichophylla* y *Muhlenbergia ligularis* inoculadas con 19 bacterias endófitas, las que se compararon con tres controles (abonamiento básico, fertilización química y sin ninguna aplicación). Los resultados en *Calamagrostis vicunarum* evidenciaron que cuatro aislados de *Bacillus mycoides* (13, 19, 12 y 16) contribuyeron entre 15.2 y 35.6% en la acumulación de S, Ca, Na, Mg, P, K y N (macronutrientes) y de Fe, B, Zn, Mn, Cu y Mo (micronutrientes). En *Festuca dolichophylla*, dos aislados de *B. mycoides* (16 y 14) y las bacterias *Paenibacillus tundrae* (10) y *Staphylococcus warneri* (7) contribuyeron entre 8.6 y 25.9% en la acumulación de S, Ca, Mg, P y K (macronutrientes) y B, Zn, Mn y Cu (micronutrientes). En *Muhlenbergia ligularis*, *Bacillus simplex* (2), *B. mycoides* (19 y 15), *P. xylanexedens* (17) y *P. amylolyticus* (9) contribuyeron entre 10.7 y 73.6% en la acumulación de Na, N, K, Mg, S, P y Ca (macronutrientes) y de Cu, Mo, B, Fe, Zn y Mn (micronutrientes). Estos resultados evidencian el potencial de las bacterias endófitas estudiadas para mejorar el contenido de nutrientes en las poaceas altoandinas, aunque muestran cierta especificidad de la especie en el efecto.

Palabras clave: bacterias endófitas nativas, absorción de nutrientes, pastizales altoandinos

¹ Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), Ayacucho, Perú

² Estación Experimental Agraria Canaán Ayacucho - INIA, Ayacucho, Perú

³ Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú

* E-mail: nery.santillana@unsch.edu.pe

Recibido: 21 de febrero de 2022

Aceptado para publicación: 4 de septiembre de 2022

Publicado: 27 de octubre de 2022

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

ABSTRACT

The aim of this research was to determine native endophytic bacteria contribution in the accumulation of nutrients in three high Andean Poaceae at 4116 m above sea level. Macro and micronutrients content in the aerial biomass of *Calamagrostis vicunarum*, *Festuca dolichophylla* and *Muhlenbergia ligularis* inoculated with 19 endophytic bacteria was determined, which were compared with three controls (basic fertilization, chemical fertilization and without any application). The results in *Calamagrostis vicunarum* showed that four isolates (13, 19, 12 and 16) contributed between 15.2 and 35.6% in the accumulation of S, Ca, Na, Mg, P, K and N (macronutrients) and Fe, B, Zn, Mn, Cu and Mo (micronutrients). In *Festuca dolichophylla* two isolates of *B. mycooides* (16 and 14), *Paenibacillus tundrae* (10) and *Staphylococcus warneri* (7) contributed between 8.6 and 25.9% in the accumulation of S, Ca, Mg, P and K (macronutrients) and B, Zn, Mn and Cu (micronutrients). In *Muhlenbergia ligularis*, *Bacillus simplex* (2), *B. mycooides* (19 and 15), *P. xylanexedens* (17) and *P. amylolyticus* (9) bacteria contributed between 10.7 and 73.6% in the accumulation of Na, N, K, Mg, S, P and Ca (macronutrients) and Cu, Mo, B, Fe, Zn and Mn (micronutrients). These results show the endophytic bacteria potential to improve the nutrient content in high Andean Poaceae, although they show some species specificity in the effect.

Key words: native endophytic bacteria, nutrient uptake, high Andean grasslands

INTRODUCCIÓN

Biogeográficamente, los ecosistemas altoandinos constituyen grandes unidades de cobertura vegetal, con formaciones herbáceas típicas. Estos ecosistemas se ubican en el contexto de la Cordillera de los Andes, entre 3800 y 4800 m sobre el nivel del mar y ocupan una superficie de 18 millones de hectáreas, que representa el 14% del territorio nacional (MINAM, 2015), donde se concentra gran parte de la actividad ganadera extensiva del país, con predominio de pastos naturales de tipo pajonal y césped de puna, entre los que destacan las poaceas.

Los pastizales naturales altoandinos desempeñan un papel importante en el mantenimiento y funcionalidad de los ecosistemas, así como en la economía y seguridad alimentaria (Flores, 2016). Además, contribuyen en la captura y almacenamiento de carbono orgánico en el suelo y biomasa (Calderón-Loor *et al.*, 2020; Huamán-Carrión *et al.*,

2021). Estos pastizales proveen forraje al 80% de la ganadería nacional; sin embargo, son de baja productividad (Oliveras *et al.*, 2014) y calidad nutricional (Flores, 2016; Castellaro *et al.*, 2020), como consecuencia de la degradación ecológica (Xie y Sha, 2012; Heitkamp *et al.*, 2014; Sylvester *et al.*, 2017; Wambui *et al.*, 2021).

Entre las especies persistentes a la degradación de los pastizales en el pajonal de puna y de amplia distribución, se encuentran las especies perennes: *Calamagrostis vicunarum*, una cespitosa con cañas de 5-25 cm de altura; *Festuca dolichophylla*, una planta amacollada con cañas de 50-70 cm de altura y *Muhlenbergia ligularis*, cespitosa con cañas decumbentes o postradas de 4-8 cm de largo (Tovar, 1993) y que a menudo se utilizan para la recuperación de pastos degradados y prevenir la erosión del suelo. Si bien algunas especies presentan cierta rusticidad que les permite crecer en las duras condiciones climáticas y la baja fertilidad del suelo de la puna, su desempeño puede ser

limitado, con disminución del crecimiento vegetativo, rendimiento de forraje y contenido de nutrientes (Crespo *et al.*, 2015). Esta situación compromete a la ciencia a desarrollar estrategias para recuperar e incluso incrementar la productividad de los pastizales mediante alternativas como el uso de bacterias endófitas promotoras de la absorción de nutrientes (BEPAN).

Las plantas no son organismos que viven aisladas de otras formas de vida, pues ahora se conoce que tienen relaciones mutualistas o simbióticas con otros organismos como los hongos o las bacterias que les permiten optimizar su desempeño en condiciones desfavorables (García-Latorre *et al.*, 2021). Para ello, las plantas recurren a su capacidad fisiológica de absorción de iones mediante respuestas plásticas del sistema radicular a través del cual se hace posible la activación de las diferentes formas de abastecimiento de nutrientes disponibles en el suelo (Hodge, 2004).

El uso de bacterias endófitas para mejorar la absorción de nutrientes en diferentes plantas está ampliamente documentado (Sá *et al.*, 2019; White *et al.*, 2019; Ochoa-Hueso *et al.*, 2020). Dentro de las bacterias endófitas, Lopes *et al.* (2018) indican que especies de *Bacillus* endofíticas son promotoras del crecimiento de plantas mediante el suministro de nutrientes y la regulación del transporte de agua; asimismo, indican que son una fuente subexplotada de moléculas novedosas de interés biotecnológico. Belincanta *et al.* (2021) señalan también las bondades del uso de bacterias endófitas en especies como *Dendrocalamus asper* y *Bambusa oldhamii*. Las bacterias endofíticas son capaces de mejorar la absorción de nutrientes de las plantas a través de la solubilización de fosfato, la fijación de nitrógeno, la producción de ácido indol-3-acético (IAA), el transporte de hierro (sideróforo), desaminasa del ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) y enzimas hidrolizantes (Hassan, 2017; Ochoa-Hueso *et al.*, 2020; Hazarika *et al.*, 2021). El efecto de bacterias

en el contenido de nutrientes en plantas ha sido reportado también por autores como Kumar *et al.* (2014), Hungria *et al.* (2021) y Verma *et al.* (2021).

La eficacia de la interacción entre las poaceas y las bacterias promotoras de la absorción de nutrientes (BEPAN) puede convertirse en una alternativa importante para incrementar la productividad de los pastizales naturales. Sin embargo, el efecto de una bacteria endófitas en una planta huésped en particular puede ser variable (Bastias *et al.*, 2021), dependiendo de la especie endofítica, el genotipo del huésped y las condiciones ambientales (Ahlholm *et al.*, 2002). Además, en un escenario de cambio climático, donde se espera una disminución de las precipitaciones en las zonas de mayor vulnerabilidad (Bilal *et al.*, 2018), el uso de estos endófitos o sus metabolitos podría contribuir a mitigar sus efectos, manteniendo niveles considerables de la producción de forraje para la fauna doméstica y silvestre, a la vez que se podría reducir el uso de fertilizantes químicos sintéticos.

En la presente investigación se planteó la hipótesis de que la inoculación de pastizales naturales con bacterias endófitas nativas mejora el contenido de macro y micronutrientes en la biomasa aérea de *Calamagrostis vicunarium*, *Festuca dolichophylla* y *Muhlenbergia ligularis*. De esta manera, el objetivo del estudio fue determinar la contribución de bacterias endófitas en la acumulación de nutrientes en tres poaceas altoandinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la comunidad de Ccarhuaccpampa, distrito de Paras, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, Perú, ubicada a una altitud de 4116 m. La temperatura media mensual fue de 3.4 a 8.6 °C y las precipitaciones mensuales variaron desde 31 a 235 mm durante el experi-

mento. Los suelos de la zona son franco-arcilloso-arenosos, con pH ácido (5.35), alto contenido de materia orgánica (6%) y nitrógeno total (0.32%), contenido medio de fósforo disponible de 17 ppm y contenido bajo de potasio (88 ppm).

Se evaluaron 19 bacterias endófitas aisladas de pastizales de la comunidad de Ccarhuaccampa-Ayacucho. Las bacterias fueron reactivadas en agar nutritivo, y multiplicadas en caldo nutritivo a 28 °C durante 48 h. Al término de este tiempo presentaron concentraciones comprendidas entre 1 a 2 x 10⁹ UFC/ml (unidades formadoras de colonias). Cada una de las bacterias multiplicadas fue mezclada con turba molida esterilizada, e incubada a 25 °C durante 48 h. Los inóculos obtenidos presentaron concentraciones superiores a 1 x 10⁸ UFC/g de turba.

Los pastizales fueron clausurados y tuvieron un área experimental de 10 000 m², en los que se distribuyeron los 22 tratamientos (19 bacterias individuales más tres controles) (Cuadro 1), utilizando el diseño Bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada unidad experimental tuvo un área de 75 m². La selección de los pastizales se realizó considerando la predominancia de las especies de interés.

Las áreas seleccionadas para la aplicación de las bacterias recibieron previamente un abonamiento básico, similar al control 1 (Cuadro 1). Las bacterias fueron aplicadas al voleo en forma de inoculante a razón de 3 kg/ha. Luego de cuatro meses de la aplicación de las bacterias se realizó el corte, al ras del suelo, de las tres poaceas seleccionadas (*Calamagrostis vicunarum*, *Festuca dolichophylla* y *Muhlenbergia ligularis*) utilizando tijeras y considerando 12 plantas por especie. Las muestras de cada especie de poacea fueron enviadas al laboratorio CERPER S.A. (Perú), para el análisis de macro (N, P, K, Ca, Mg, S, Cl y Na) y micronutrientes (B, Cu, Fe, Zn, Mn y Mo) de la biomasa aérea.

Los resultados fueron evaluados mediante el análisis multivariante de datos y de componentes principales (ACP), análisis de conglomerados y correlaciones con el programa estadístico RStudio y MultBiplot Win64 (Villardón, 2015). Asimismo, se determinaron los porcentajes de incremento por efecto de las bacterias en cada uno de los nutrientes y poaceas.

RESULTADOS

Contribución de las bacterias endófitas en la acumulación de nutrientes de poaceas

En *Calamagrostis vicunarum*, el análisis de componentes principales (ACP) (Figura 1A), demostró el agrupamiento (*cluster*) de las bacterias en tres grupos, con base a similitudes de las bacterias en la acumulación de nutrientes. El grupo 1, conformado por las bacterias 11, 6, 18, 15 y los controles 1 y 3, se relacionó con los macronutrientes K, N y Cl. El grupo 2, constituido por las bacterias 16, 19, 9, 14, 12, 13, 8 y control 2, se relacionaron con los macronutrientes N, Cl, Ca, S, Na y Mg y con los micronutrientes Mo, Fe y B. El grupo 3, conformado por las bacterias 7, 1, 3, 10, 4, 2, 17 y 5, no se relacionó con nutriente alguno. Estos resultados indicaron un comportamiento diferenciado de las bacterias, destacando las integrantes del grupo 2 por relacionarse con el mayor número de nutrientes.

El análisis de componentes principales (ACP) en *Festuca dolichophylla* (Figura 1B) también reportó el agrupamiento (*cluster*) de las bacterias en tres grupos. El grupo 1, constituido por las bacterias 14, 10, 7, 11, 3, 1, 15, 8, 13, 12 y el control 3, se relacionaron con los macronutrientes K, N, S y Ca y con los micronutrientes Mo, Fe, Cu y Zn. El grupo 2, conformado por las bacterias 5, 9 y control 1, no se relacionaron con nutriente alguno; en tanto que el grupo 3, conformado por las bacterias 3, 17, 6, 18, 2, 19, 4, 16 y el

Cuadro 1. Bacterias endófitas en estudio y controles

Bacterias	Especie	N° de accesoión	N° de aislado
Bacteria 1	<i>Bacillus simplex</i>	AB363738	1
Bacteria 2	<i>Bacillus simplex</i>	AB363738	2
Bacteria 3	<i>Paenibacillus chitinolyticus</i>	AB021183	1
Bacteria 4	<i>Paenibacillus chitinolyticus</i>	AB021183	2
Bacteria 5	<i>Bacillus simplex</i>	AB363738	3
Bacteria 6	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	1
Bacteria 7	<i>Staphylococcus warneri</i>	L37603	1
Bacteria 8	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	2
Bacteria 9	<i>Paenibacillus amylolyticus</i>	D85396	1
Bacteria 10	<i>Paenibacillus tundrae</i>	EU558284	1
Bacteria 11	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	3
Bacteria 12	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	4
Bacteria 13	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	5
Bacteria 14	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	6
Bacteria 15	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	7
Bacteria 16	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	8
Bacteria 17	<i>Paenibacillus xylanexedens</i>	EU558281	1
Bacteria 18	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	9
Bacteria 19	<i>Bacillus mycoides</i>	ACMU01000002	10
Control 1	Solo con abonamiento básico (Guanosol, roca fosfórica, KSO ₄)		
Control 2	Solo con fertilización química (150-200-150 de NPK)		
Control 3	Sin bacteria, sin fertilización y sin abonamiento		

control 2, se relacionó con los macronutrientes Cl y Na. El comportamiento de las bacterias en esta especie fue igualmente diferente, destacando los integrantes del grupo 1 por relacionarse con el mayor número de nutrientes.

En el caso de *Muhlenbergia ligularis*, el ACP (Figura 1C) se estableció tres grupos (*cluster*). El primero constituido por las bacterias 11, 4, 6, 7, 12, 1 y 5 y el segundo por las bacterias 13, 3, 8 y 18 y el control 3, donde estos dos grupos no se relacionaron con nutriente alguno. El grupo 3 constituido por las bacterias 15, 2, 10, 14, 9, 19, 17 y los controles 1 y 2, se relacionaron con los

macronutrientes S, Mg, K, N, Na y los micronutrientes B, Mo, Zn, Cu y Fe. En esta especie, por lo tanto, destacó el grupo 3.

La matriz de correlaciones en *Calamagrostis vicunarum* (Figura 2A) presentó similar tendencia de agrupamiento obtenidos en el ACP; sin embargo, considerando los valores mayores de uno (>1) de la escala MultBiplot de aporte a la acumulación de nutrientes, destacó la bacteria 16, que aportó a la acumulación de los macronutrientes de S, Ca, Na, Mg, P y de los micronutrientes Fe, B, Zn, Mn y Cu. Asimismo, la bacteria 12 contribuyó a la acumulación de K, Cl, Ca, Na

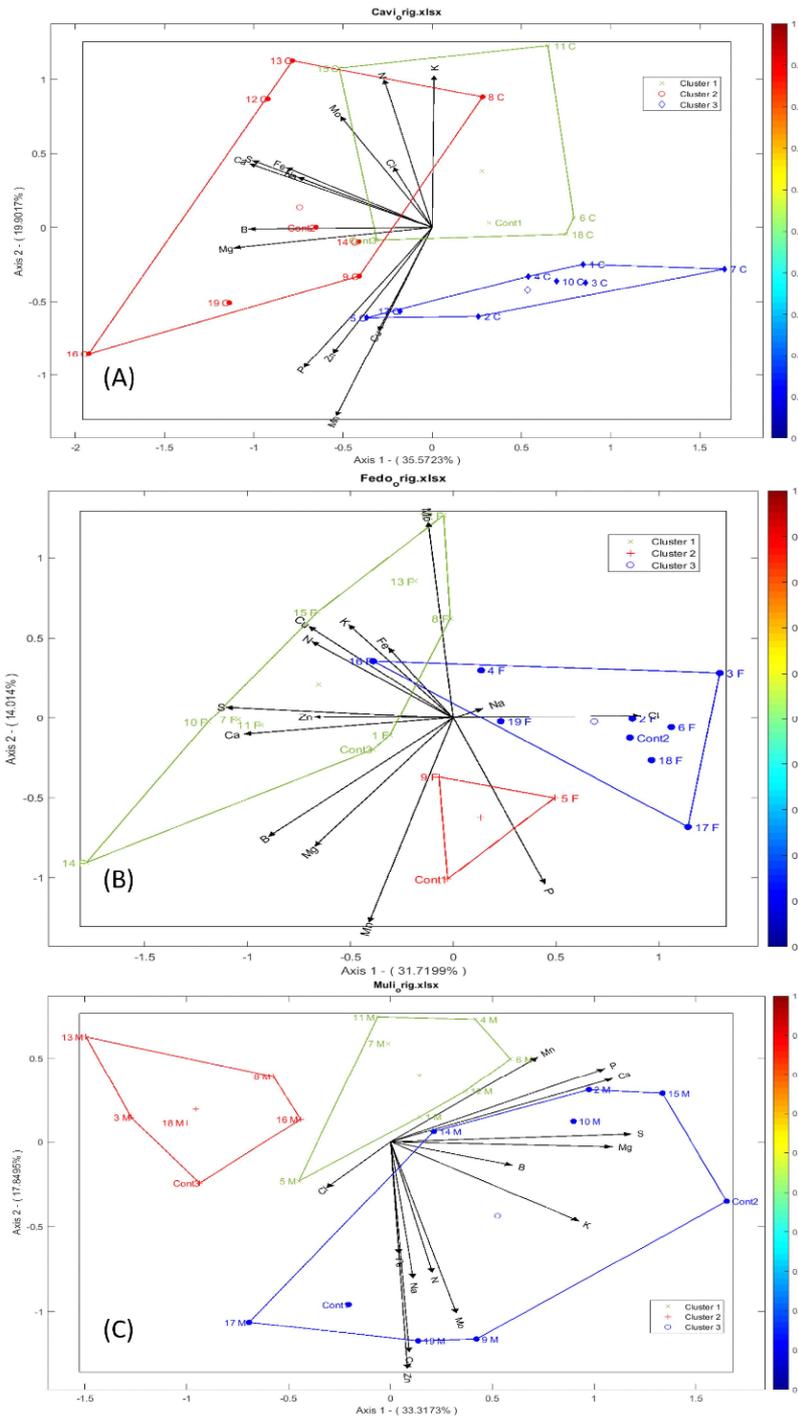


Figura 1. Agrupamiento de bacterias y nutrientes mediante el análisis de componentes principales (ACP) en: *Calamagrostis vicunarum* (A), *Festuca dolichophylla* (B) y *Muhlenbergia ligularis* (C)

Bacterias endófitas y acumulación de nutrientes en poaceas altoandinas

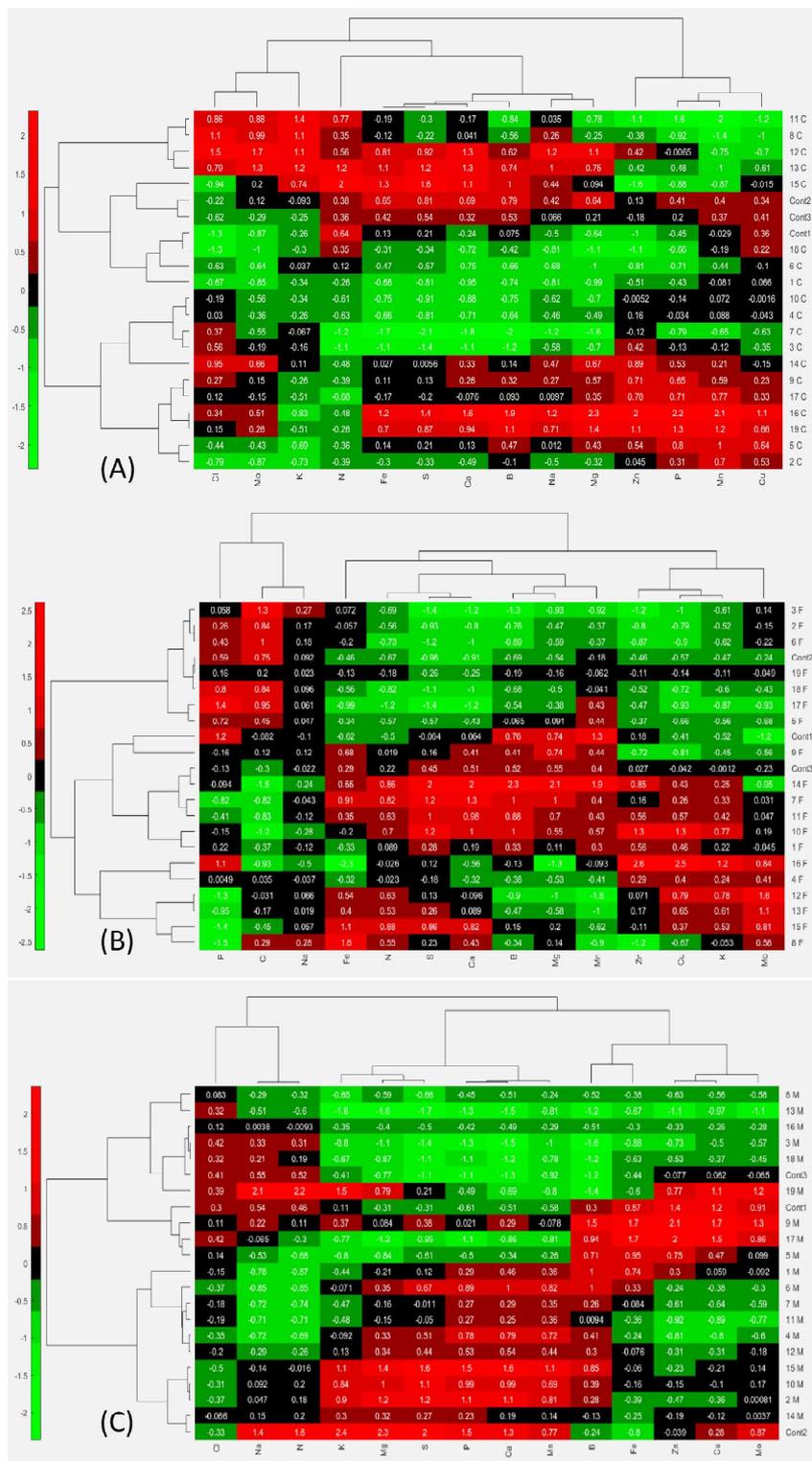


Figura 2. Matriz de correlación y escala Multibiplot de las bacterias y su contribución a la acumulación de nutrientes en *Calamagrostis vicinarum* (A), *Festuca dolichophylla* (B) y *Muhlenbergia ligularis* (C)

y Mg (macronutrientes) y Mo (micronutrientes); la bacteria 13 a los macronutrientes K, N, S, Ca, Na y micronutrientes Fe y Mo; la bacteria 15 a los macronutrientes N, S y Ca y a los micronutrientes Fe y B y la bacteria 19 aportó a los macronutrientes Mg, P y a los micronutrientes B, Zn, y Mn. Los controles no aportaron a la acumulación de los nutrientes. En resumen, este grupo de bacterias (16, 12, 13, 15 y 19) estarían contribuyendo a la acumulación de los macronutrientes: S, Ca, Na, Mg, P, K, N, y de los micronutrientes: Fe, B, Zn, Mn, Cu y Mo.

La matriz de correlaciones en *Festuca dolichophylla* (Figura 2B) presentó una similar tendencia de agrupamiento del ACP; sin embargo, considerando los valores mayores de uno (>1) de la escala MultBiplot de aporte a la acumulación de nutrientes, destacaron las bacterias 14 que contribuyó a la acumulación de los macronutrientes de S, Ca y Mg y de los micronutrientes B y Mn; la bacteria 7 a la acumulación de S, Ca y Mg y del micronutriente B; la bacteria 10, a la acumulación de S y Ca (macronutrientes) y B, Zn y Cu (micronutrientes); y la bacteria 16, a los macronutrientes P y K, y micronutrientes Zn y Cu. Por otro lado, el control 1 aportó a la acumulación de P y Mn, mientras que el resto de los controles no aportaron a la acumulación de nutrientes. En resumen, este grupo de bacterias (14, 7, 10, 16) estaría contribuyendo a la acumulación de los macronutrientes: S, Ca, Mg, P y K y de los micronutrientes: B, Zn, Mn y Cu.

La matriz de correlaciones en *Muhlenbergia ligularis* (Figura 2C), presentó similar tendencia de agrupamiento del ACP, y considerando los valores mayores de uno (>1) de la escala MultBiplot de aporte a la acumulación de nutrientes, destacaron las bacterias 19 que aportó a la acumulación de los macronutrientes de Na, N y K y de los micronutrientes Cu y Mo; la bacteria 9 contribuyó a la acumulación de los micronutriente B, Fe, Zn, Cu, Mo; la bacteria 15 que aportó a la acumulación de K, Mg, S, P y Ca (macronutrientes) y Mn (micronutrientes); la

bacteria 2 a los macronutrientes Mg, S, P y Ca, y la bacteria 17 a los micronutrientes Fe, Zn y Cu. Asimismo, el control 1 aportó a la acumulación de los micronutrientes Zn y Cu, el control 2 a la acumulación de los macronutrientes Na, N, K, Mg, S, P y Ca; en tanto que el aporte del control 3 fue nulo. En resumen, este grupo de bacterias (19, 9, 15, 2, 17) estaría aportando a la acumulación de los macronutrientes: Na, N, K, Mg, S, P y Ca y micronutrientes: Cu, Mo, B, Fe, Zn y Mn.

Incremento en el contenido de nutrientes en la biomasa aérea de tres especies de poaceas

Los porcentajes de incremento en el contenido de macro y micronutrientes por efecto de las bacterias en la biomasa aérea de las tres poaceas fueron dependientes de la especie de la planta y del tipo de bacteria.

En *Calamagrostis vicunarum* (Figura 3A), las bacterias incrementaron entre 4 a 67% los contenidos de todos los nutrientes, destacando el K (67%), Mn (57%), Na (50%), Mo (48%), Cl (35%) y Ca (25%), mientras que el incremento de los demás nutrientes fue entre 4 a 17%. En la Figura 3B se verifica que las bacterias 16, 12, 19, 13, 5, 9, 14, 17 y 8 contribuyeron en el incremento del contenido de nutrientes con porcentajes entre 3.36 a 35.64%, destacando las bacterias 16, 12, 19 y 13 que contribuyeron con 35.64, 23.93, 18.50 y 15.21%, respectivamente.

Los incrementos en *Festuca dolichophylla* (Figura 3C) fueron entre 10 a 100%, destacando los nutrientes Na (100%), Mo (87%), Cl (39%), Zn (28%), K (27%), P (26%), Mn (23%) y Fe (20%), mientras que en el resto de los nutrientes fue entre 10 a 17%. Asimismo, en *F. dolichophylla* se verificó que las bacterias contribuyeron en el incremento de nutrientes mencionados en 2.25 a 25.89% (Figura 3D) destacando las bacterias 7 (25.89%), 11 (22.07%), 12 (14.75), 10 (13.25), 4 (11.93%), y 14 (11.82%), en tanto que el resto de las bacterias incrementaron entre 2.25 a 9.82%.

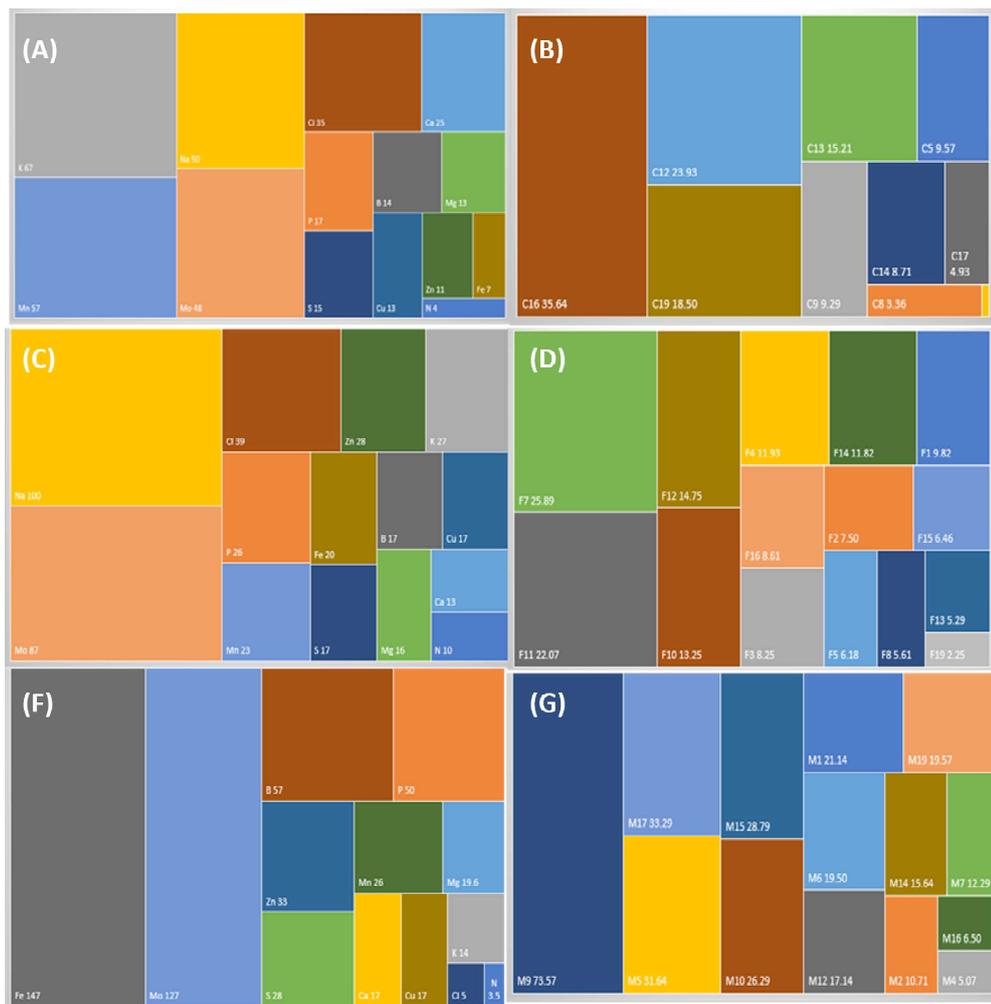


Figura 3. Incremento y contribución de bacterias en la acumulación de nutrientes en *Calamagrostis vicunarum* (A, B), *Festuca dolichophylla* (C, D) y *Muhlenbergia ligularis* (E, F)

Las bacterias incrementaron los contenidos de todos los nutrientes en *Muhlenbergia ligularis* (Figura 3E), excepto Na, entre 3.5 a 147%, destacando los incrementos de Fe (147%), Mo (127%), B (57%) P (50%), Zn (33%), S (28%), y Mn (26%). El resto de los nutrientes (Mg, Ca, Cu, K, Cl y N) fueron incrementados entre 3.5 a 19.6%. En esta especie se verificó que las bacterias 9, 17, 5, 15, 10, 1, 19, 6, 12, 14 contribuyeron en la acumulación de nutrientes con porcentajes de 73.57, 33.29, 31.64, 28.79, 26.29, 21.14, 19.57, 19.50, 17.14, y 15.64% respectivamente (Figura 3F).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos han demostrado la contribución de las bacterias endófitas en la acumulación de nutrientes en las Poaceas evaluadas, superando en la mayoría de los casos a los controles.

El incremento de los macronutrientes por influencia de los microorganismos ha sido reportado por varios autores. Hungria *et al.* (2021), al trabajar con *Urochloa (Brachiaria)* spp, encontraron un incremento del

contenido de N entre 11.7 y 20.7% y de K entre 9.9 y 11.3% al inocular *Azospirillum brasilense*, y de 33.3 y 36.6% para P, de 10.6 y 13.6% para K con *Pseudomonas fluorescens*, aunque estos incrementos fueron inferiores a los observados en la presente investigación. Asimismo, García-Latorre *et al.* (2021) informan sobre incrementos en los contenidos de Na y S (10.34 y 14.29%, respectivamente) en *Trifolium subterraneum* y *Poa pratensis* inoculadas con el endófito E408; en tanto que Cipriano *et al.* (2021) obtuvieron incrementos de N (4%), P (12.6%), K (11.5%), Ca (6%), Mg (6.6%) y S (12.3%) en caña de azúcar, que también es una poacea, inoculada con bacterias endófitas, siendo estos incrementos inferiores a los encontrados en el presente estudio.

El incremento de los micronutrientes por influencia de los microorganismos también ha sido reportado por varios autores. Por ejemplo, García-Latorre *et al.* (2021) inocularon *Trifolium subterraneum* y *Poa pratensis* con diferentes endófitos aumentando la absorción de B, Cu y Zn en proporciones semejantes a las del presente estudio. Asimismo, Cipriano *et al.* (2021) informan incrementos de Mn, Cu, Zn, B y Fe en caña de azúcar inoculada con bacterias endófitas frente al control sin inocular, con valores igualmente similares a los de este trabajo, con excepción del B. Del mismo modo, Kumar *et al.* (2014) indicaron sobre el efecto de *Bacillus megaterium*, *Arthrobacter chlorophenolicus* y *Enterobacter* en granos de trigo, y Boleta *et al.* (2020) con inóculos de *Azospirillum* en cultivares de trigo presentaron valores similares o inferiores a los de la presente investigación, dependiendo del nutriente.

Referente a los porcentajes de incremento ejercidos por las bacterias, se observaron mayores porcentajes de incremento de K (67%), Ca (25%) y Mn (57%) en *C. vicinarum*, Na (100%) en *F. dolichophylla* y Fe (147%), Mo (127%), B (57%), P (50%), S (28%) en *M. ligularis*, lo cual demuestra la diversidad de respuesta de las especies a la inoculación con bacterias endófitas. Este

comportamiento variado de las bacterias en las poaceas también ha sido observado por otros autores. Al respecto, Bastias *et al.* (2021) mencionan que el efecto de un endófito en una planta hospedante en particular puede variar dependiendo de la especie endofítica, el genotipo del hospedador y las condiciones ambientales. Asimismo, Afzal *et al.* (2019) manifiestan que la especie de la planta huésped determina el tipo de bacteria endofítica que la coloniza. Cipriano *et al.* (2021), por otro lado, informan sobre los variados comportamientos de bacterias endófitas en la acumulación de nutrientes (*Paraburkholderia caribensis*, *Kosakonia radicincitans*, *Paraburkholderia tropica*, *Pseudomonas fluorescens*, *Herbaspirillum frisingense*) inoculadas en caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

Es importante considerar la necesidad de reafirmar los resultados de la presente investigación porque en el suelo existen otros organismos (bacterias, hongos, protozoarios, etc.) y diferentes condiciones de suelo (ácidos húmicos, fúlvico, etc.) que también podrían haber contribuido en la absorción de estos nutrientes.

CONCLUSIONES

- Los resultados muestran la capacidad de las bacterias endófitas para acumular mayor porcentaje de nutrientes en la biomasa aérea de las poaceas altoandinas.
- Se evidencia una acción diferenciada de las bacterias endofitas según especie de poacea.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Fondo de Desarrollo Socioeconómico de Camisea (FOCAM) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por la subvención económica prestada para la ejecución de la presente investigación.

LITERATURA CITADA

1. **Afzal I, Shinwaria ZK, Sikandar S, Shahzad S. 2019.** Plant beneficial endophytic bacteria: mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiol Res* 221: 36-49. doi: 10.1016/j.micres.2019.02.001
2. **Ahlholm JU, Helander M, Lehtimäki S, Wali P, Saikkonen K. 2002.** Vertically transmitted fungal endophytes: different responses of host-parasite systems to environmental conditions. *Oikos* 99: 173-183.
3. **Bastias DA, Gianoli E, Gundel PE. 2021.** Fungal endophytes can eliminate the plant growth-defence trade-off. *New Phytol* 230: 2105-2113. doi: 10.1111/nph.17335
4. **Belincanta C, Botelho G, Ornellas TS, Zappellini J, Guerra MP. 2021.** Characterization of the endophytic bacteria from *in vitro* culture of *Dendrocalamus asper* and *Bambusa oldhamii* and assessment of their potential effects in *in vitro* co-cultivated plants of *Guadua chacoensis* (Bambusoideae, Poaceae). *In Vitro Cell Dev Biol Plant* 58: 122-132.
5. **Bilal L, Asaf S, Hamayun M, Gul H, Iqbal A, Ullah I, Lee IJ, Hussain A. 2018.** Plant growth promoting endophytic fungi *Aspergillus fumigatus* TS1 and *Fusarium proliferatum* BRL1 produce gibberellins and regulates plant endogenous hormones. *Symbiosis* 76: 117-127. doi: 10.1007/s13199-018-0545-4
6. **Boleta EHM, Shintate Galindo F, Jalal A, Santini JMK, Rodrigues WL, Lima BHd, Arf O, et al. 2020.** Inoculation with growth-promoting bacteria *Azospirillum brasilense* and its effects on productivity and nutritional accumulation of wheat cultivars. *Front Sustain Food Syst* 4: 607262. doi: 10.3389/fsufs.2020.607262
7. **Calderón-Loor M, Cuesta F, Pinto E, Gosling WD. 2020.** Carbon sequestration rates indicate ecosystem recovery following human disturbance in the equatorial Andes. *Plos One* 15: e0230612. doi: 10.1371/journal.pone.0230612
8. **Castellano G, Orellana C, Escanilla J, Bastias C, Cerpa P, Raggi L. 2020.** Botanical composition and diet quality of the vicuñas (*Vicugna vicugna* Mol) in highland range of Parinacota, Chile. *Animals* 10: 1205. doi: 10.3390/ani10071205
9. **Cipriano MAP, Freitas-Iório RdP, Dimitrov MR, de Andrade SAL, Kuramae EE, Silveira APD. 2021.** Plant-growth endophytic bacteria improve nutrient use efficiency and modulate foliar N-metabolites in sugarcane seedling. *Microorganisms* 9: 479. doi: 10.3390/microorganisms-9030479
10. **Crespo G, Rodríguez I, Lok S. 2015.** Contribución al estudio de la fertilidad del suelo y su relación con la producción de pastos y forrajes. *Rev Cub Cienc Agríc* 49: 211-219.
11. **Flores ER. 2016.** Cambio climático: pastizales altoandinos y seguridad alimentaria. *Glaciares Ecosist Montaña* 1: 73-80.
12. **García-Latorre C, Rodrigo S, Santamaría O. 2021.** Effect of fungal endophytes on plant growth and nutrient uptake in *Trifolium subterraneum* and *Poa pratensis* as affected by plant host specificity. *Mycol Prog* 20: 1217-1231. doi: 10.1007/s11557-021-01732-6
13. **Hassan S. 2017.** Plant growth-promoting activities for bacterial and fungal endophytes isolated from medicinal plant of *Teucrium polium* L. *J Adv Res* 8: 687-695. doi: 10.1016/j.jare.2017.09.001
14. **Hazarika SN, Saikia K, Borah A, Thakur D. 2021.** Prospecting endophytic bacteria endowed with plant growth promoting potential isolated from *Camellia sinensis*. *Front Microbiol* 12: 738058. doi: 10.3389/fmicb.2021.738058
15. **Heitkamp F, Sylvester SP, Kessler M, Sylvester MD, Jungkunst HF. 2014.** Sitios andinos inaccesibles revelan

- meteorización inducida por humanos en suelos de pastoreo. *Prog Phys Geog* 38: 576-601. doi: 10.1177/0309133314544918
16. **Hodge A. 2004.** The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytol* 162: 9-24. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01015.x
 17. **Huamán-Carrión ML, Espinoza-Montes F, Barrial-Lujan AI, Ponce-Atencio Y. 2021.** Influencia de la altitud y características del suelo en la capacidad de almacenamiento de carbono orgánico de pastos naturales altoandinos. *Sci Agropecu* 12: 83-90. doi: 10.17268/sci.agropecu.2021.010
 18. **Hungria M, Rondina AB, Nunes ALP, Araujo RS, Nogueira MA. 2021.** Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiarias (*Urochloa* spp) as an economic and environmental opportunity to improve plant growth, forage yield and nutrient status. *Plant Soil* 463: 171-186. doi: 10.1007/s11104-021-04908-x
 19. **Kumar A, Maurya BR, Raghuwanshi R. 2014.** Isolation and characterization of PGPR and their effect on growth, yield and nutrient content in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Biocatal Agric Biotechnol* 3: 121-128. doi: 10.1016/j.bcab.2014.08.003
 20. **Lopes R, Tsui S, Gonçalves P, Vieira de Queiroz M. 2018.** A look into a multifunctional toolbox: endophytic *Bacillus* species provide broad and underexploited benefits for plants. *World J Microbiol Biotechnol* 34: 94. doi: 10.1007/s11274-018-2479-7
 21. **[MINAM] Ministerio del Ambiente. 2015.** Mapa Nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva. Perú: MINAM. [Internet]. Disponible en: <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/178>
 22. **Ochoa-Hueso R, Arca V, Delgado-Baquerizo M, Hamonts K, Piñeiro J, Serrano-Grijalva L, Shawyer-Julien PS. 2020.** Links between soil microbial communities, functioning, and plant nutrition under altered rainfall in Australian grassland. *Ecol Monogr* 90: e01424. doi: 10.1002/ecm.1424
 23. **Oliveras I, Girardin C, Doughty CE, Cahuana N, Arenas CE, Oliver V, Huaraca W, Malhi Y. 2014.** Andean grasslands are as productive as tropical cloud forests. *Environ Res Lett* 9: 115011. doi: 10.1088/1748-9326/9/11/115011
 24. **Sá GCR, Carvalho CLM, Moreira A, Hungria M, Nogueira MA, Heinrichs R, Soares Filho CV. 2019.** Biomass yield, nitrogen accumulation and nutritive value of mavuno grass inoculated with plant growth-promoting bacteria. *Commun Soil Sci Plan* 50: 1931-1942. doi: 10.1080/00103624.2019.1648498
 25. **Sylvester SP, Heitkamp F, Sylvester MD, Jungkunst, HF, Sipman JM, Toivonen JM, Gonzales CA, et al. 2017.** Relict high-Andean ecosystems challenge our concepts of naturalness and human impact. *Sci Rep* 7: 3334. doi: 10.1038/s41598-017-03500-7
 26. **Tovar O. 1993.** Las gramíneas (Poaceas) del Perú. CSIC. 480 p.
 27. **Verma SK, Sahu PK, Kumar K, Pal G, Gond SK, Kharwar RN, White JF. 2021.** Endophyte roles in nutrient acquisition, root system architecture development and oxidative stress tolerance. *J Appl Microbiol* 131: 2161-2177. doi: 10.1111/jam.15111
 28. **Villardón JLV. 2015.** MultBiplot: a package for multivariate analysis using Biplots. University of Salamanca, Spain. [Internet]. Disponible en: <http://biplot.dep.usal.es/multbiplot/introduction.html>
 29. **Wambui S, Koskey G, Mugendi E, Maingi JM, 2021.** Revitalization of bacterial endophytes and rhizobacteria for nutrients bioavailability in degraded soils to promote crop production. *AIMS Agric Food* 6: 496-524. doi: 10.3934/agrfood.2021029

30. **White J, Kingsley K, Zhang Q, Verma R, Obi N, Dvinskikh S, Elmore M, et al. 2019.** Endophytic microbes and their potential applications in crop management. *Pest Manag Sci* 75: 2558-2565. doi: 10.1002/ps.5527
31. **Xie Y, Sha Z. 2012.** Quantitative analysis of driving factors of grassland degradation: a case study in Xilin river basin, Inner Mongolia. *Sci World J* 12: 169724. doi: 10.1100/2012/169724