

Influencia de *Bacillus* sp. sobre los atributos químicos y microbiológicos del suelo y el desarrollo de la soja y el maíz

Lex João Alves¹
Danielly Wisoczynski de Sene¹
Gabriel Ferreira de Paula¹
Gilberto Bueno Demétrio¹
Leopoldo Sussumu Matsumoto^{2§}

¹Universidad Estatal del Norte de Paraná-*Campus* Luiz Meenghel-Estudios de Posgrado en Agronomía. Rod. Br. 369 km 54, Bandeirantes-Paraná-Brasil. CP. 86360-000. Tel. +55(43) 35428053. (alex.joao.alves@hotmail.com; danielly.2595@hotmail.com; gfdepaula1@gmail.com; demetrio@ffalm.br). ²Universidad Estatal del Norte de Paraná-*Campus* Luiz Meneghel-Centro de Ciencias Biológicas. Rod. Br. 369 km 54, Bandeirantes-Paraná-Brasil. CP. 86360-000. Tel. +55(43) 35428058.

§Autor para correspondencia: leopoldo@uenp.edu.br.

Resumen

Las rizobacterias promotoras del crecimiento de plantas (RPCP) habitan la rizosfera de varias plantas cultivadas. Las bacterias del género *Bacillus* tienen una gran diversidad funcional de importancia en el desarrollo de las plantas. El objetivo de la investigación fue evaluar las diferentes dosis de *Bacillus* sp., en el desarrollo del cultivo de soja y maíz y en los atributos químicos y microbiológicos del suelo. Los ensayos se realizaron en campo en la cosecha 2016 a 2017. Las semillas de soja y maíz se trataron con dos dosis de *Bacillus* sp., a una concentración de 10^9 UFC ml⁻¹, en el cual se utilizó la dosis de 10 y 20 ml por 100 kg de semilla de soja y 80 y 100 ml por 100 kg de semilla de maíz. El trabajo fue un bloque al azar con cuatro repeticiones. Se evaluaron los atributos químicos, microbiológicos y de desarrollo vegetal. Los resultados demuestran que la actividad microbiana a la dosis de 20 ml de *Bacillus* sp., fue mayor y eso influyó positivamente en el peso de los granos y su productividad de soja. En maíz, la dosis de 80 ml de *Bacillus* sp., mostró un mejor desempeño de los atributos químicos y microbiológicos, mostrando un aumento en la masa de brotes y raíces, y un aumento significativo en la productividad. Con base en los resultados obtenidos, la agricultura sustentable, con la dosis de 20 ml y 80 ml por 100 kg de semillas de soja y maíz, respectivamente, presentó mejores resultados en la actividad microbiana y en el desarrollo de plantas.

Palabras clave: *Glycine max*, *Zea mays* L., bioindicadores de la calidad del suelo, inoculantes, rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.

Recibido: febrero de 2021

Aceptado: abril de 2021

Introducción

La soja y el maíz son cultivos agrícolas en el mundo y Brasil destaca con una producción récord de 120.9 millones de toneladas de soja y 100.9 millones de toneladas de maíz en la cosecha 2019/2020 (CONAB, 2020). Ambos cultivos son importantes para forraje, aceites, combustibles y la alimentación humana (CONAB, 2020). Debido al crecimiento de la población, la demanda de alimentos requiere el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a los cultivos con el objetivo de mejorar la calidad y el aumento de la producción de granos (Ratz *et al.*, 2017; Buchelt *et al.*, 2019).

El éxito en el establecimiento de un cultivo depende del suelo y del medio ambiente, que deben ser adecuados para la germinación de semillas, la aparición y el desarrollo de plántulas (Modolo *et al.*, 2011). Además, el cultivo de soja y maíz dependen del material de propagación, que se selecciona correctamente, con alto poder de germinación, excelente vigor y sin contaminación con plagas y enfermedades (Migliorini *et al.*, 2017).

Para aumentar la productividad y reducir los costos, se han buscado alternativas para reducir el uso de insumos y pesticidas. Una alternativa es el uso de rizobacterias como promotores de crecimiento de las plantas (PGPR), que es una opción biológica prometedora en el control de fitopatógenos, desarrollo de plantas y aumento de la productividad de los cultivos (Hernández-Hernández *et al.*, 2018). PGPR son bacterias que se encuentran en la rizosfera, la superficie radicular en asociación con las raíces y a menudo están aisladas de la rizosfera de varias plantas cultivadas, para promover el crecimiento (Ratz *et al.*, 2017). *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Serratia*, *Azotobacter*, entre otros se encuentran entre los géneros más estudiados (Araújo y Guerreiro, 2010). Los beneficios observados en varios cultivos con la inoculación de bacterias del género *Bacillus*, muestran su gran potencial como agentes de control biológico, producción de antibióticos naturales y efecto protector contra fitopatógenos del suelo. Estos organismos apoyan el crecimiento y desarrollo de las raíces, una mayor absorción de agua y nutrientes, favoreciendo el desarrollo del cultivo, dando lugar a una producción de calidad de sus semillas (Ferreira *et al.*, 2018; Machado y Costa, 2018). El uso de *Bacillus*, puede contribuir con fitohormonas y señales moleculares, aumentando el crecimiento de la raíz, la nodulación, la tasa de fijación de N₂ y reduciendo la susceptibilidad al estrés hídrico (Ferreira *et al.*, 2018; Machado y Costa, 2018; Buchelt *et al.*, 2019).

El uso de *Bacillus* spp., como especies promotoras de crecimiento para varios cultivos agrícolas proporciona un método atractivo, eficiente y menos agresivo en comparación con pesticidas y fertilizantes químicos. Esto hace que la práctica de utilizar bioagentes sea una alternativa más sostenible desde un punto de vista económico y ambiental (Shafi *et al.*, 2017). Varias especies de PGPR han sido estudiadas cada vez más y su aplicación se intensificó para aumentar la productividad. Sin embargo, todas y cada una de las actividades antrópicas, ya sea el manejo cultural o la introducción de productos y organismos en el suelo, pueden causar impacto o estrés a la comunidad microbiana del suelo responsable de la mineralización y descomposición de nutrientes. Por lo tanto, el uso de indicadores de calidad del suelo (bioindicadores) es sensible a cualquier cambio o manejo del suelo (Simão *et al.*, 2020).

En este estudio, se llevaron a cabo dos pruebas de campo con el fin de evaluar la influencia de los tratamientos de semillas con dos dosis de *Bacillus* spp., sobre los atributos químicos y microbiológicos del suelo y sobre el desarrollo de cultivos de soja y maíz.

Materiales y métodos

Las pruebas se realizaron durante el curso 2016/2017, en la escuela agrícola de la Universidad Estatal del Norte de Paraná (S23° 06' 24.7" y W 50° 21' 37.36" y 439 m de altitud), *Campus Luiz Meneghel* (CLM), ubicado en el municipio de Bandeirantes, Paraná, Brasil. El suelo en el área experimental está clasificado como Eutrófico RED Latosol (EMBRAPA, 2006). El clima de la región se clasifica como tipo Cfa (Koppen y Geiger), subtropical húmedo. Durante los meses de los experimentos (octubre de 2016 a febrero de 2017) la temperatura media máxima fue de 28 °C y la mínima de 18 °C, la precipitación media mensual fue de 200 mm (Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios climáticos-CPTEC). Las pruebas se llevaron a cabo con la variedad de soja (*Glycine max* L.) BMX potencia y la variedad de maíz (*Zea mays* L.) KWS 9004 en bloque al azar con cuatro replicaciones.

Bacterias inoculadas

La bacteria *Bacillus* sp., evaluada en este estudio fue aislada de muestras de suelo recogidas en la Escuela Agrícola de la Universidad Estatal del Norte de Paraná-CLM. Área de siembra para cultivos agrícolas con aplicación de fertilizante biológico durante tres años consecutivos.

Cultivo e inoculación de *Bacillus* sp. en semillas de soja y maíz

Bacillus sp., fue aislado y cultivado en caldo de nutrientes y mantenido en BOD a 28 °C hasta que la población bacteriana alcanzó la concentración de 1×10^9 CFU ml⁻¹ determinado por un espectrofotómetro a 530 nm, según la Instrucción Normativa N° 13 del Departamento de Defensa Agrícola del 24 de marzo de 2011. Las semillas de soja y maíz fueron inoculadas aproximadamente diez minutos antes de sembrarlas. Las semillas fueron inoculadas con dos dosis de suspensión bacteriana, la dosis comercial propuesta y el doble de la dosis (Tabla 1). Para ambos cultivos, 2 kg de semilla fueron tratados con *Bacillus* sp., en una concentración de 1×10^9 CFU ml⁻¹ homogeneizado en bolsas de plástico, transferido en bolsas de papel y mantenido a la sombra hasta la siembra.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos (dosis y concentración) de las pruebas de inoculación de semillas de soja y maíz con *Bacillus* sp.

Tratamientos	Bacteria	Concentración (CFU ml ⁻¹)	Dosis (ml 100 kg ⁻¹ de semillas)	
			Soja	Maíz
T1	Sin inoculación	-	-	-
T2	<i>Bacillus</i> sp.	1×10^9	10	80
T3	<i>Bacillus</i> sp.	1×10^9	20	100

CFU= unidad de formación de colonias.

Instalación de experimentos

El cultivo de soja y maíz se instaló en el campo en el sistema de siembra directa y las semillas fueron sembradas con la ayuda de una sembradora de bicicleta. La soja se sembró a una densidad de 13 semillas por metro y 45 cm de espaciado entre filas. Junto con la siembra, se llevó a cabo

una fertilización básica con 300 kg ha⁻¹ del fertilizante formulado (NPK) 0-10-10. El maíz se sembró a la densidad de tres semillas por metro lineal y con un espaciado de 50 cm entre las líneas. La fertilización básica se llevó a cabo con 250 kg ha⁻¹ del fertilizante formulado (NPK) 10-18-18.

El diseño experimental fue un bloque aleatorizado, con tres tratamientos y cuatro réplicas para cada cultivo (soja y maíz), cada parcela de 5 m de ancho y 6 m de largo, haciendo un área de 30 m². Los tratamientos consistieron en el control y dos dosis de *Bacillus* sp., a una concentración de 10⁹ CFU ml⁻¹ (Tabla 1). La recolección de suelo para análisis químico y microbiológico se llevó a cabo después de la cosecha a una profundidad de 0-10 cm, con 7 muestras recogidas para obtener una muestra compuesta de una parcela, que fueron homogeneizadas, empaquetadas en bolsas de plástico y transportadas en una caja térmica al Laboratorio de Microbiología del Suelo, en la Universidad Estatal del Norte de Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, donde fueron separadas de desechos vegetales y animales y tamizadas en una malla de 2 mm.

Análisis químico del suelo

Después de secar al aire las muestras del suelo, el pH se determinó en 0.01 M CaCl₂, P, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Al³⁺. Los contenidos de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Al³⁺ fueron extraídos con 1 M KCl y determinados por absorción atómica (Ca²⁺ y Mg²⁺) y valorados con 0.025 M NaOH (Al³⁺); P y K⁺ fueron extraídos con extractor Mehlich-1 y determinados por espectrofotometría de ionización de llama (K⁺) y por el método azul de molibdeno (P).

Análisis microbiológico del suelo

Carbono de biomasa microbiana (MBC). El contenido de carbono de la biomasa microbiana del suelo fue determinado por el método de extracción fumigación-indirecta (FIE) (Vance *et al.*, 1987). Respiración basal (BRS) y determinación del cociente metabólico del suelo (qCO₂). La respiración basal del suelo y el qCO₂ se determinaron con la metodología propuesta por Silva *et al.* (2010).

Carbono orgánico total (TOC) y cociente microbiano (qMIC). La determinación de TOC se llevó a cabo en combustión de materia orgánica a través del mojado, utilizando 0.5 g de muestra, según Walkley y Black (1934-modificado), sin calefacción externa en la placa. El qMIC fue determinado por la relación MBC/TOC.

Análisis agronómico

La evaluación de altura y longitud de la raíz se determinó a partir de 10 plantas elegidas al azar. Para el vástago y la masa radicular, se muestrearon cinco plantas por parcela. El rendimiento de la soja se determinó mediante la cosecha de 4 m lineales por parcela y también se obtuvo el peso de 1 000 granos. La productividad del maíz se determinó mediante la cosecha de 2 m lineales por parcela, obteniendo un peso de 200 granos. En el momento de la cosecha, los granos (soja y maíz) estaban al 13% de humedad. Los resultados de productividad se determinaron en kg ha⁻¹.

Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando Sisvar (versión 5.7, DEX/UFLA). Los promedios se presentaron mediante Anova. Al confirmar un valor *p* estadísticamente significativo, la prueba de Tukey (*p* < 0.05) se aplicó con fines de comparación (Ferreira, 2019).

Resultados y discusión

En cultivos de soja, el análisis químico demostró que la inoculación de *Bacillus* sp., independientemente de la dosis, dio lugar a una reducción significativa del contenido de pH, materia orgánica y potasio en comparación con el control (Tabla 2). Esto puede estar relacionado con la degradación de la materia orgánica por bacterias, que pueden oxidar una amplia gama de compuestos orgánicos y fermentativos (Stamford *et al.*, 2005). Las rizobacterias que promueven el crecimiento de las plantas pueden ayudar a acelerar la descomposición de la materia orgánica como en el proceso de mineralización (Persello-Cartineaux *et al.*, 2003). La materia orgánica sirve como fuente de carbono y energía para microorganismos, porque un alto contenido de material orgánico se asocia con una gran diversidad microbiana (Wetler-Tonini *et al.*, 2010).

En T2, se observó un ligero aumento en el contenido de fósforo. Los estudios realizados con *Bacillus subtilis* han demostrado una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo, lo que indica una mayor absorción de P y N, en plantas inoculadas con PGPR en las semillas (Araújo, 2008). El aumento también puede estar relacionado con el método de siembra directa, causado por una menor movilización del suelo, además de la formación de complejos de fósforo con materia orgánica, mayor actividad biológica y reciclaje de nutrientes por las raíces y residuos de cultivos.

Tabla 2. Análisis químico del suelo realizado después de la cosecha de soja, de áreas con y sin inoculación de *Bacillus* sp.

Prueba	MO (g kg ⁻¹)	pH (CaCl ₂)	P (mg dm ⁻³)	K Ca Mg Al H+Al					CEC	V (%)
				(mol _c dm ⁻³)						
T1	33.24 a	5.15 a	5.5 a	0.64 a	6.48 a	2.78 a	0 b	4.66 a	14.55 ab	68.03 a
T2	28.54 b	4.88 b	8.29 a	0.41 b	6 a	3.18 a	0.18 a	5.28 a	14.86 a	64.5 a
T3	27.53 b	5.03 ab	4.84 a	0.32 b	5.8 a	2.85 a	0.03 b	4.65 a	13.61 b	65.76 a
CV (%)	2.38	2.53	38.91	18.49	9.86	8.39	61.24	8.46	4.02	4.16

MO= materia orgánica; P= phosphorus; K= potasio; Ca= calcium; Mg= magnesium; Al= aluminio; H+Al= potencia de acidéz; CEC= capacidad de intercambio catiónico; V%= saturación; T1= control sin bacterias; T2= *Bacillus* sp., 10 ml 100 kg⁻¹ semilla; T3= *Bacillus* sp., 20 ml 100 kg⁻¹ semilla. Los promedios seguidos de la misma letra minúscula en la columna no difieren según la prueba de Tukey con un 5% de probabilidad.

En el maíz, los análisis químicos mostraron menos cambios en los parámetros evaluados, con sólo una caída en el contenido de P y K observado con la inoculación de *Bacillus* sp. (Tabla 3). Esto probablemente está relacionado con las rizobacterias que promueven la mineralización de nutrientes, solubilización de fosfatos, fijación de nitrógeno y mayor absorción de nutrientes por las raíces (Lazarovits y Nowak, 1997).

En cultivos de soja, los parámetros microbiológicos mostraron una disminución en el contenido de TOC en tratamientos inoculados con las bacterias (T2 y T3). Esto puede estar relacionado con el aumento de la biomasa microbiana, siendo significativamente mayor en T3 (154. 66) en comparación con los otros tratamientos (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis químico del suelo realizado después de la cosecha de soja, de áreas con y sin inoculación de *Bacillus* sp.

Prueba	MO (g kg ⁻¹)	pH (CaCl ₂)	P (mg dm ⁻³)	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CEC	V (%)
T1	21.82 a	5.03 a	31.35 a	0.74 a	5.7 a	3.33 a	0.05 a	7.2 a	16.97 a	58.22 a
T2	24.51 a	5.03 a	22.44 b	0.4 b	6.4 a	3.28 a	0.03 a	6.3 a	16.37 a	61.52 a
T3	24.17 a	4.95 a	16.11 b	0.41 b	6.55 a	2.33 a	0.08 a	5.69 a	14.97 a	61.88 a
CV (%)	15.42	3.92	42.82	13.13	21.97	24.1	141.4	23.36	6.31	11.95

MO= materia orgánica; P= fósforo; K= potasio; Ca= calcio; Mg= magnesio; Al= aluminio; H+Al= potencial de acidez; CEC= capacidad de intercambio catiónico; V%= saturación; T1= control sin bacterias; T2= *Bacillus* sp., 10 ml 100 kg⁻¹ semilla; T3= *Bacillus* sp., 20 ml 100 kg⁻¹ semilla. Los promedios seguidos de la misma letra minúscula en la columna no difieren según la prueba de Tukey con un 5% de probabilidad.

Además del aumento significativo del MBC en T3, hubo una mejor tasa de descomposición y mineralización de la materia orgánica en el suelo (*q*MIC), así como una respiración más baja (SBR) y un menor estrés metabólico (*q*CO₂) (Tabla 3). En los cultivos de maíz, se observaron los mejores valores para los parámetros microbiológicos en el tratamiento T2, con biomasa microbiana significativamente mayor (175.87) y más alto *q*MIC (1.25). En consecuencia, se observó menos estrés metabólico (2.26) (Tabla 4). La biomasa microbiana (BM) es la parte viva del suelo y actúa sobre la descomposición de la materia orgánica en el suelo. La cantidad y composición de la biomasa microbiana puede verse influenciada por varios factores, incluyendo el sistema de cultivo, la rotación de cultivos y la textura del suelo (Venzke-Filho *et al.*, 2008).

Tabla 4. Análisis de los atributos microbiológicos del suelo en el cultivo de soja con y sin inoculación de *Bacillus* sp.

Prueba	TOC (g kg ⁻¹)	MBC (mg C kg ⁻¹)	<i>q</i> MIC (%)	SBR (mg C-CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹)	<i>q</i> CO ₂ (SBR C.MBS ⁻¹)
T2	16.55 b	83.83 b	0.51 b	0.71 a	8.53 a
T3	15.97 b	154.66 a	0.97 a	0.36 b	2.29 c
CV (%)	2.38	12.75	12.99	24.52	18.71

TOC= carbono orgánico total; MBC= carbono de biomasa microbiana; (*q*MIC)= cociente microbiano; (SBR)= respiración basal del suelo; (*q*CO₂)= cociente metabólico del suelo; T1= control; T2= *Bacillus* sp., 10 ml 100 kg⁻¹ semilla; T3= *Bacillus* sp. 20 ml 100 kg⁻¹ semilla. Los promedios seguidos de la misma letra minúscula en la columna no difieren según la prueba de Tukey con un 5% de probabilidad.

El cociente microbiano (*q*MIC) es equivalente al porcentaje de reserva de carbono orgánico total en el suelo, considerado como valores de suelo equilibrado entre 1.8 y 2.2% (Jakelaitis *et al.*, 2008). Las áreas con baja actividad microbiana presentan valores más bajos, lo que demuestra la pérdida de carbono en el suelo, lo que indica una menor disponibilidad de compuestos orgánicos para las plantas (Simão *et al.*, 2020). Las variaciones en los valores *q*MIC reflejan el patrón de entrada de materia orgánica del suelo, la eficiencia de la conversión de C microbiano, las pérdidas de C en el suelo y la estabilización de C orgánico por fracciones minerales del suelo (Cunha *et al.*, 2011).

A medida que la biomasa microbiana se vuelve más eficiente en el uso de los recursos ecosistémicos, menos CO₂ se pierde a través de la respiración y cuanto mayor sea la proporción de C incorporado en los tejidos microbianos, lo que resulta en una disminución de $q\text{CO}_2$ en el suelo (Cunha *et al.*, 2011). Las estimaciones de biomasa microbiana se han utilizado en estudios de flujo de C y N, ciclo de nutrientes y productividad vegetal en ecosistemas terrestres, permitiendo también la asociación de la cantidad de nutrientes inmovilizados y la actividad de biomasa microbiana con fertilidad y potencial de productividad del suelo (Gama-Rodrigues *et al.*, 2008). En el estudio de Chagas *et al.* (2017), con soja y frijol, las plantas mostraron resultados superiores de acumulación de biomasa, demostrando el potencial de *Bacillus sp.*, como promotor de crecimiento para ambos.

Los atributos agronómicos evaluados en el cultivo de soja no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos; sin embargo, hubo una tendencia de mayor altura vegetal, mayor longitud de la raíz y en consecuencia, mayor productividad en el tratamiento T3 (Tabla 6). Esto puede estar relacionado con el aumento de la biomasa y el cociente microbianos (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de los atributos microbiológicos del suelo en el cultivo del maíz con y sin *Bacillus sp.*

Prueba	TOC (g kg ⁻¹)	C-MBS (mg C kg ⁻¹)	$q\text{MIC}$ (%)	SBR (mg C-CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹)	$q\text{CO}_2$ (SBR C-MBS ⁻¹)
T1	12.66 a	98.32 b	0.78 b	0.26 b	2.66 b
T2	14.22 a	175.87 a	1.25 a	0.4 ab	2.26 b
T3	14.02 a	91.77 b	0.67 b	0.47 a	5.17 a
CV (%)	15.42	11.43	14.8	24.9	26.89

TOC= carbono orgánico total; MBC= carbono de biomasa microbiana; $q\text{MIC}$ = cociente microbiano; SBR= respiración basal del suelo; ($q\text{CO}_2$)= cociente metabólico del suelo. T1= control; T2= *Bacillus sp.*, 10 ml 100 kg⁻¹ semilla; T3= *Bacillus sp.*, 20 ml 100 kg⁻¹ semilla. Los promedios seguidos de la misma letra minúscula en la columna no difieren según la prueba de Tukey con un 5% de probabilidad.

Tabla 6. Parámetros de desarrollo de soja (brote y raíz) y rendimiento después de la inoculación de las semillas con *Bacillus sp.*, en dos dosis.

Prueba	Brote		Raíz		Rendimiento	
	H (cm)	FSM (g)	RL (cm)	DRM (g)	W1000 (g)	(kg ha ⁻¹)
T1	28.1 a	27.46 a	20.15 a	24.27 a	127.5 b	2.98 a
T2	28.13 a	27.69 a	20.7 a	25.71 a	128.57 ab	3.096 a
T3	29 a	27.25 a	23.6 a	25.35 a	134.28 a	3.249 a
CV (%)	4.07	8.16	8.16	5.96	2.5	8.45

H= altura de la planta; FSM= masa de brote fresca; RL= longitud de la raíz; DRM= masa de raíz seca; W1 000= peso 1 000 granos; kg ha⁻¹= kilogramo por hectárea. T1= control; T2= *Bacillus sp.*, 10 ml 100 kg⁻¹ semilla; T3= *Bacillus sp.*, 20 ml 100 kg⁻¹ semilla. Los promedios seguidos de la misma letra minúscula en la columna no difieren según la prueba de Tukey con un 5% de probabilidad.

Las bacterias en hábitats naturales colonizan el interior y el exterior de los órganos vegetales y pueden ser beneficiosas, neutras o dañinas para su crecimiento (Mariano *et al.*, 2004). Domenech *et al.* (2006) demostraron que *Bacillus sp.*, productores de auxines mejoraron el desarrollo de la planta, aumentando la altura y el peso de la parte aérea. Este aumento permitió una mejor tasa fotosintética y en consecuencia, una mejor eficiencia en el uso del agua y un aumento de la producción (Szilagy-Zecchin *et al.*, 2015).

Las plantas que tienen microorganismos asociados con sus raíces o en la rizosfera tienden a tener una mejor capacidad para sobrevivir y en consecuencia, una mejor absorción de nutrientes. Así, las plantas que están aseguradas de factores beneficiosos por microorganismos tienen una ventaja productiva sobre las que no lo están (Chagas *et al.*, 2017).

En el maíz, los beneficios de la inoculación con *Bacillus* sp., fueron más evidentes, mostrando una mayor altura vegetal y materia seca, tanto en brote como en raíz. Sin embargo, la productividad fue significativamente mayor en el tratamiento T2 (6.026 kg ha⁻¹) (Tabla 7). Moreira (2014) destacó la especificidad de la asociación entre la bacteria *Bacillus* spp. y la planta, ya que el genotipo de las plantas es un factor determinante para obtener los beneficios de la inoculación.

Tabla 7. Parámetros del desarrollo del maíz (brote, raíz y rendimiento), con inoculación de *Bacillus* sp., en dos dosis.

Prueba	Brote		Raíz		Rendimiento	
	H (cm)	FSM (g)	RL (cm)	DRM (g)	W200 (g)	(kg ha ⁻¹)
T1	69.25 b	104.02 b	25.55 a	34.68 b	68.44 a	5.024 b
T2	83.75 a	125.75 a	23.55 a	39.6 a	69.42 a	6.026 a
T3	81.35 a	124.84 a	22.55 a	38.32 ab	67.27 a	4.885 b
CV (%)	5.7	4.69	34.26	5.86	4.25	4.34

H= altura de la planta; FSM= masa de brote fresca; RL= longitud de la raíz; DRM= masa de raíz seca; W200= peso de 200 granos; kg ha⁻¹= kilogramo por hectárea. T1= control; T2= *Bacillus* sp., 10 ml 100 kg⁻¹ semilla; T3=*Bacillus* sp., 20 ml 100 kg⁻¹ semilla. Los promedios seguidos de la misma letra minúscula en la columna no difieren según la prueba de Tukey con un 5% de probabilidad.

Bacillus sp., promueve el crecimiento y el rendimiento de diferentes cultivos, además de mejorar la capacidad de absorción de nutrientes, lo que resulta en plantas más vigorosas (Shafi *et al.*, 2017). Dotto *et al.* (2010); Rodrigues *et al.* (2006), informaron que contrastaban los resultados de productividad de diferentes híbridos de maíz con aplicación bacteriana. Lima *et al.* (2011), reportaron resultados positivos en el desarrollo de brotes vegetales y raíces, mejorando su establecimiento y en consecuencia el rendimiento del grano en su investigación de semillas de maíz con *Bacillus* spp., sembrado en el suelo que recibió fertilización NPK.

El éxito de *B. subtilis* en la promoción del crecimiento de las plantas está relacionado con las características biológicas de estos microorganismos, que son fáciles de mantener (Lanna-Filho *et al.*, 2010). La promoción del crecimiento causada por *Bacillus* spp., es el resultado del aumento de la fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes, síntesis de fitohormonas y mejores condiciones del suelo (Lanna-Filho *et al.*, 2010).

Conclusiones

La inoculación de *Bacillus* sp., demostró diferentes resultados en cultivos de soja y maíz. En soja, la aplicación de *Bacillus* sp., mostró mejores resultados en atributos microbiológicos en la dosis más alta, (el doble de la dosis comercial). En los otros atributos no hubo cambios importantes. Es importante tener en cuenta que la inoculación de bacterias no causa daños en la producción de cultivo. Este resultado se investigará más a fondo en el futuro, con el objetivo de desarrollar un producto comercial basado en *Bacillus* sp., exponiendo una evolución positiva en el desarrollo y rendimiento de la planta.

En los cultivos de maíz estudiados, la inoculación de *Bacillus* sp., dio lugar a un aumento en el brote vegetal, raíz y rendimiento, en la dosis comercial, tuvo gran importancia el aumento de la población microbiana del suelo, y en consecuencia un mayor rendimiento del maíz. Aún se necesitan más estudios con *Bacillus* sp., para determinar su papel como protector celular que se mantiene viables durante el período de germinación de semillas y otras variables que pueden interferir con su supervivencia. Es así que, existe un gran potencial para el desarrollo de inoculantes comerciales.

Reconocimientos

Agradecemos a la Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Educación Superior (CAPES) por el apoyo de una beca de maestría y a la Fundación Araucaria por la beca de iniciación científica.

Literatura citada

- Araújo, F. F. 2008. Inoculação de sementes com *Bacillus subtilis*, formulado com farinha de ostras e desenvolvimento de milho, soja e algodão. *Ciência e Agrotecnologia*. 2(32):456-462. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000200017>.
- Araújo, F. F. and Guerreiro, R. T. 2010. Bioprospection of *Bacillus* isolates promoters of corn growth in natural and sterile soil. *Ciência e Agrotecnologia*. 4(34):837-844. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000400007>.
- Buchelt, A. C.; Metzler, C. R.; Castiglioni, J. L.; Dassoller, T. F. y Lubian, M. S. 2019. Aplicação de bioestimulantes e *Bacillus subtilis* na germinação e desenvolvimento inicial da cultura do milho. *Revista de Agricultura Neotropical*. 4(6):69-74. <https://doi.org/10.32404/rean.v6i4.2762>.
- Chagas, L. F. B.; Martins, A. L. L.; Carvalho F. M. R.; Miller, L. O.; Oliveira, J. C. y Chagas Junior, A. F. 2017. *Bacillus subtilis* e *Trichoderma* sp. no incremento da biomassa em plantas de soja, feijão-caupi, milho e arroz. *Revista Agri-Environmental Sciences*. 2(3):1-18. <https://revista.unitins.br/index.php/agri-environmental-sciences/index>.
- CONAB. 2020. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra de grãos Safra 2019/2020. Brasil. 7(10):1-69.
- Cunha, E. Q.; Stone, L. F.; Moreira, J. A. A.; Ferreira, E. P. B.; Didonet, A. D. y Leandro, W. M. 2011. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I-Atributos físicos do solo. *Rev. Brasileira de Ciência do Solo*. 2(35):589-602. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200029>.
- Domenech, J.; Reddy, M. S.; Kloepper, J. W.; Ramos, B. and Gutierrez-Mañero, J. 2006. Combined application of the biological product LS213 with *Bacillus*, *Pseudomonas* or *Chryseobacterium* for growth promotion and biological control of soil-borne diseases in pepper and tomato. *BioControl*. 51:245-258. Doi: 10.1007/s10526-005-2940-z.
- Dotto, A. P.; Lana, M. C.; Steiner, F. y Frandoloso, J. F. 2010. Produtividade do milho em resposta à inoculação com *Herbaspirillum seropedicae* sob diferentes níveis de nitrogênio. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. 3(5):376-382. Doi: 10.5039/agraria.v5i3a898.
- EMBRAPA. 2006. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. (Ed.). Rio de Janeiro. EMBRAPA-SPI. 306 p.

- Ferreira, D. F. 2019. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria* [S.l.]. 4(37):529-535. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- Ferreira, N. C.; Mazzuchelli, R. C. L.; Pacheco, A. C.; Araújo, F. F.; Antunes, J. E. L. y Araújo, A. S. F. 2018. *Bacillus subtilis* improves maize tolerance to salinity. *Ciência Rural*. 8(48):1-4. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20170910>.
- Gama-Rodrigues E. F.; Barros, N. F.; Viana, A. P. y Santos, G. A. 2008. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 4(32):1489-1499. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400013>.
- Hernández-Hernández, E. J.; Hernández-Rios, I.; Almaraz-Suarez, J. J.; López-López, A.; Torres-Aquino, M. y Flores, F. J. M. 2018. Caracterización *in vitro* de rizobacterias y su antagonismo com hongos causantes del damping off em Chile. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(9):525-537. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.335>.
- Jakelaitis, A.; Silva, A. A.; Santos, J. B. y Vivian, R. 2008. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2(38):118-127.
- Lanna Filho, R.; Ferro, H. M. y Pinho, R. S. C. 2010. Controle biológico mediado por *Bacillus subtilis*. *Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas*. 2(4):12-20. <http://dx.doi.org/10.0000/rtcab.v4i2.145>.
- Lazarovits, G. and Nowak, J. 1997. Rhizobacteria for improvement of plant growth and establishment. *HortScience*. 2(32):188-192. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.32.2.188>.
- Lima, F.; Nunes, L. A. P. L.; Figueiredo, M. V. B.; Araújo, F. F.; Lima, L. M. y Araújo, A. S. F. 2011. *Bacillus subtilis* e adubação nitrogenada na produtividade do milho. *Revista Brasileira de Ciência Agrárias*. 4(6):657-661. Doi: 10.5039/agraria.v6i4a1429.
- Machado, A. P. y Costa, M. J. N. 2018. Biocontrole do fitonematóide *Pratylenchus brachyurus* in vitro e na soja em casa de vegetação por *Bacillus subtilis*. *Revista Biociências*. 1(23):83-84.
- Mariano, R. L. R.; Silveira, E. B.; Assis, S. M. P.; Gomes, A. M. A.; Nascimento, A. R. P. y Donato, V. M. T. S. 2004. Importância de bactérias promotoras de crescimento e de biocontrole de doenças de plantas para uma agricultura sustentável. *Anais da Academia Pernambucana de Ciências Agrônômica, Recife*. 1(1):89-111.
- Migliorini, P.; Lazarotto, M.; Müller, J.; Oruoski, P.; Bovolini, M. P.; Barbieri, M.; Tunes, L. V. M. y Muniz, M. F. B. Qualidade fisiológica sanitária e transmissão de patógenos em sementes de canola. *Colloquium Agrariae*. 3(13):67-76. Doi: 10.5747/ca.2017.v13.n3.a175.
- Modolo, A. J.; Trogello, E.; Nunes, A. L.; Silveira, J. C. M. y Kolling, E. M. 2011. Efeito da compactação do solo sobre a semente no desenvolvimento da cultura do feijão. *Acta Scientiarum Agronomy*. 1(33):89-95. Doi: 10.4025/actasciagron.v33i1.4236.
- Moreira, J. C. F. 2014. Milho safra submetido à inoculação com bactérias diazotróficas associativas e doses de nitrogênio. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso, Rondonópolis, MT. 64 p.
- Persello-Cartieaux, F.; Nussaume, L. and Robaglia, C. 2003. Tales from the underground: molecular plant-rhizobacteria interactions. *Plant, Cell and Environment*. 2(26):189-199. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.00956.x>.

- Ratz, R. J.; Palácio, S. M.; Espinoza-Quiñones, F. R.; Vicentino, R. C.; Michelim, H. J. y Richter, L. M. 2017. Potencial biotecnológico de rizobactérias promotoras de crescimento de plantas no cultivo de milho e soja. *Engevista*. 4(19):890-905. Doi: 10.22409/engevista.v19i4.894.
- Rodrigues, L. S.; Baldani, V. L. D.; Reis, V. M. y Baldani, J. I. 2006. Diversidade de bactérias diazotróficas endofíticas dos gêneros *Herbaspirillum* e *Burkholderia* na cultura do arroz inundado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2(41):275-284. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200012>.
- Shafi, J.; Tian, H. and Mingshan, Ji. 2017. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, Abingdon. 3(31):446-459. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950>.
- Silva, R. R. D.; Silva, M. L. N.; Cardoso, E. L.; Moreira, F. M. D. S.; Curi, N. y Alovisei, A. M. T. 2010. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes-MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 5(34):1584-1592. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000500011>.
- Simão, G., Demétrio, G. B.; Paula, G. F.; Ladeira, D. C. y Matsumoto, L. S. 2020. Influence of spent coffee grounds on soil microbiological attributes and maize crop. *Research, Society and Development*. 8(9):1-16. Doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.6400>.
- Stamford, N. P.; Stamford, T. L. M.; Andrade, D. E. G. T. y Michereff, S. J. 2005. Microbiota dos solos tropicais. *In: ecologia e manejo de patógenos radiculares em solos tropicais*. Michereff, S. J. Andrade, D. E. G. T. y Menezes, M. (Ed.). Imprensa Universitária, Recife: UFRPE. 61-92 pp.
- Szilagyi-Zecchin, V. J.; Mógor, A. F.; Ruaro, L. y Röder, C. 2015. Crescimento de mudas de tomateiro (*Solanum lycopersicum*) estimulado pela bactéria *Bacillus amyloliquefaciens* subsp. plantarum FZB42 em cultura orgânica. *Revista de Ciências Agrárias*. 1(38):26-33.
- Vance, E. D.; Brookes, P. C. and Jenkinson, D. S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*. 6(19):703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).
- Venzke-Filho, S. P.; Feigl, B. J.; Piccolo, M. C.; Siqueira Neto, M. y Cerri, C. C. 2008. Biomassa microbiana do solo em sistema de plantio direto na região de Campos Gerais-Tibagi, PR. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2(32):599-610. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200015>.
- Walkley, A. and Black, I. A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 1(37):29-38.
- Wetler-Tonini, R. M. C.; Rezende, C. E. y Grativol, A. D. 2010. Degradação e biorremediação de compostos do petróleo por bactérias: revisão. *Oecologia Australis*. 4(14):1010-1020. Doi: 10.4257/oeco.2010.1404.11.