



## Sinergias entre microorganismos y fertilización mineral en la calidad de semilla de papa (*Solanum tuberosum* L.)

### Synergies between microorganisms and mineral fertilization in potato seed quality (*Solanum tuberosum* L.)

Miguel Tueros<sup>1</sup>, Melina Vilcapoma<sup>1</sup>, Guido Pillaca<sup>1</sup>, José Velásquez<sup>1</sup>,

Henry Campos<sup>1</sup>, Omar Paitamala<sup>2</sup>, Daniel Matsusaka<sup>2\*</sup>

#### RESUMEN

La productividad del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) requiere estrategias nutricionales que optimicen el rendimiento sin afectar la calidad comercial de la semilla. En este contexto, la aplicación de microorganismos específicos que mejoren la disponibilidad de nutrientes y el desempeño fisiológico del cultivo representa una estrategia sostenible. Este estudio evaluó el efecto de la fertilización órgano-mineral y la inoculación con *Trichoderma viride* y *Bacillus subtilis* sobre el rendimiento y la calidad comercial del tubérculo en dos variedades de papa (INIA 303-Canchán y Yungay) bajo condiciones agroecológicas de los Andes peruanos. Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 3x3x2 y tres repeticiones por tratamiento, sumando un total de 54 UE. Se evaluaron 3 niveles de fertilización (0 %, 50 % y 100 % NPK) y 3 niveles de microorganismos (sin microorganismo, *Trichoderma*, *Bacillus*) y dos cultivares de papa. Se aplicó ANOVA robusto (WRS2) y prueba de Sidak ( $\alpha = 0.05$ ). El peso de tubérculos por planta fue mayor con fertilización completa y microorganismos:  $m1 \times n3 = 2.043 \pm 0.13$  kg;  $m2 \times n3 = 1.928 \pm 0.13$  kg. La variedad Yungay superó a Canchán en todas las categorías, con mayor producción de semilla de primera:  $21.8 \pm 1.48$  kg vs.  $15.7 \pm 1.48$  kg, alcanzando un máximo de  $27.0 \pm 3.14$  kg en  $m3 \times n3$ . No se hallaron diferencias significativas entre tratamientos para peso de semilla PC2 y PC3; sin embargo, sí entre variedades: Yungay (PC2:  $18.2 \pm 1.08$  kg; PC3:  $13.7 \pm 0.81$  kg) e INIA 303-Canchán (PC2:  $13.4 \pm 1.08$  kg; PC3:  $10.7 \pm 0.81$  kg). Se concluye que la integración de PGPM con fertilidad química mejora rendimiento y calidad de semilla, favoreciendo sistemas agrícolas sostenibles en Ayacucho.

**Palabras clave:** *Solanum tuberosum* L., *Bacillus subtilis*, *Trichoderma viride*, rendimiento, semilla.

#### ABSTRACT

Soil microorganisms hold considerable promise for the development of integrated, sustainable agricultural systems. Potato (*Solanum tuberosum* L.) crop productivity requires nutritional strategies that optimize yield without affecting seed commercial quality. In this context, the application of specific microorganisms that improve nutrient availability and crop physiological performance represents a sustainable strategy. This study evaluated the effect of organo-mineral fertilization and inoculation with *Trichoderma viride* and *Bacillus subtilis* on seed yield and commercial quality of tubers in two potato varieties (INIA 303- Canchán and Yungay) under the agroecological conditions of the Peruvian Andes. A completely randomized design (CRD) with a 3x3x2 factorial arrangement and three replications per treatment was used, totaling 54 DUs. Three fertilization levels (0%, 50%, and 100% NPK) and three levels of microorganisms (no microorganisms, *Trichoderma*, *Bacillus*) and two potato cultivars were evaluated. Robust ANOVA (WRS2) and Sidak's test ( $\alpha = 0.05$ ) were applied. Tuber weight per plant was higher with complete fertilization and microorganisms:  $m1 \times n3 = 2.043 \pm 0.13$ kg;  $m2 \times n3 = 1.928 \pm 0.13$ kg. The Yungay variety outperformed Canchán in all categories, with higher first-grade seed production:  $21.8 \pm 1.48$ kg vs.  $15.7 \pm 1.48$ kg, reaching a maximum of  $27.0 \pm 3.14$ kg in  $m3 \times n3$ . No significant differences were found between treatments for PC2 and PC3 seed weights; However, there was a difference between the Yungay (PC2:  $18.2 \pm 1.08$ kg; PC3:  $13.7 \pm 0.81$ kg) and INIA 303-Canchán (PC2:  $13.4 \pm 1.08$ kg; PC3:  $10.7 \pm 0.81$ kg) varieties. It is concluded that the integration of PGPM with chemical fertility improves seed yield and quality, promoting sustainable agricultural systems in Ayacucho.

**Keywords:** *Solanum tuberosum* L., *Bacillus subtilis*, *Trichoderma viride*, yield, seed.

<sup>1</sup>Estación Experimental Agraria Canaán, Dirección de Supervisión y Monitoreo de las Estaciones Experimentales. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Ayacucho, Perú.

<sup>2</sup>Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico (DIDET). Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Lima 15200, Perú.

\*Autor de correspondencia. E-mail: dmatsusaka@agro.uba.ar

## I. INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum L.*) originaria de los Andes peruanos (Spooner et al., 2005), constituye un alimento esencial a nivel global, posicionándose como componente clave en la seguridad alimentaria mundial (Adekanmbi et al., 2024). Más allá de su alto valor nutricional, exhibe también una notable capacidad de adaptación lo que le permite prosperar en diversos entornos agroclimáticos (Camire et al., 2009; Campos y Ortiz, 2020; Ahmadu et al., 2021). A lo anterior se suma que Perú es uno de los centros de diversidad genética natural más importantes, con más de 7540 accesiones, lo que constituye una ventaja estratégica para programas de mejoramiento y producción de semilla certificada (Machida, 2015). De acuerdo con el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, 2024), la agricultura peruana ha registrado un crecimiento sostenido de la demanda nacional de semilla de papa. El rendimiento nacional alcanzó 379.284 kg/ha en 2022. Particularmente, el departamento de Ayacucho ha demostrado incrementos notables en su rendimiento durante las últimas campañas, favorecido por precipitaciones y temperaturas óptimas, se tradujo en un aumento del 37.9% en la campaña 2023-2024 respecto al ciclo anterior (Pérez, 2024).

No obstante, este avance productivo está amenazado por prácticas de manejo poco sostenibles, dado que la producción de semilla de calidad ha estado acompañada por un uso intensivo e inadecuado de fertilizantes químicos, lo que ha contribuido a la degradación del suelo y la contaminación de recursos hídricos (Ashitha y Mathew, 2021). Cabe destacar que la eficiencia de aprovechamiento de los fertilizantes químicos rara vez supera el 40% (Maaz et al., 2025). Como consecuencia, se ha reportado una disminución del contenido óptimo de materia orgánica, comprometiendo la fertilidad y la capacidad productiva del suelo a mediano plazo (Abebe et al., 2022). Además, este proceso contribuye a la contaminación de aguas subterráneas, la eutrofización y la emisión de óxido nitroso, un gas de efecto invernadero que intensifica el cambio climático (Smith et al., 1999; Galloway et al. 2003; Conley et al., 2009; Reay et al., 2012).

En este escenario, los microorganismos promotores de crecimiento vegetal se perfilan como una alternativa sostenible para optimizar la nutrición de plantas, mejorar la calidad de las semillas de papa, fortalecer la resiliencia frente a factores de estrés biótico y disminuir la dependencia de insumos de fertilizantes químicos (Arif et al., 2020; Das et al., 2022). Las rizobacterias PGPR del género *Bacillus*, como *B. subtilis* y *B. amyloliquefaciens*, mejoran la disponibilidad de fósforo, zinc y potasio, fijan nitrógeno y reducen el estrés hídrico. Además, controlan patógenos como *Fusarium spp.* y *Rhizoctonia solani* mediante lipopeptidos antifúngicos, logrando inhibiciones del 45–60 % y 49.87 %, respectivamente, favoreciendo el crecimiento vegetal y mejor calidad de semilla de papa. (El-Daim y Meijer, 2019; Akhtyamova et al., 2021; Mehmood et al., 2021; Saini et al., 2021). *Bacillus subtilis*, aplicado al suelo o vía foliar, reduce los síntomas del virus de la papa Y (PVY) entre 32.8 % y 72.3 %, según el tiempo post-inoculación, confirmando su potencial como agente de biocontrol antiviral este aspecto es básico en producción de semilla de buena calidad (Amin et al., 2023).

Por otra parte, los hongos del género *Trichoderma* clasificados como hongos promotores del crecimiento vegetal (PGPF), destacan por su importante contribución a la agricultura sostenible, siendo *Trichoderma viride* uno de los representantes más relevantes debido a su capacidad de mejorar la fertilidad del suelo, incrementar la absorción de nutrientes y ejercer un control biológico eficaz frente a enfermedades del suelo y por consecuencia una buena calidad fitosanitaria de la semilla de papa. (Heflish et al., 2021; Rakibuzzaman et al., 2021; Woo et al., 2023; Iqbal et al., 2024). Otra característica del *Trichoderma* es la reducción de la carga viral PVY hasta en 18.76 % en comparación con plantas no tratadas (Aseel et al., 2023).

En tal sentido incorporación de *Trichoderma* y *Bacillus* en los programas de manejo agrícola contribuye a reducir el uso de agroquímicos sintéticos y preservar la salud del agroecosistema, consolidando un modelo productivo y más resiliente y sostenible. (Kumar et al., 2022; Nadeem et al., 2021; Purwantisari et al., 2022).

Aunque la evidencia científica respalda el uso de estos microorganismos, aún existe escasa información sobre su efecto combinado con fertilización mineral en el rendimiento y calidad de semilla en variedades de papa de la región Ayacucho.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la inoculación de *Trichoderma viride* (en adelante *Trichoderma*) y *Bacillus subtilis* (en adelante *Bacillus*) en dos variedades de papa de alto rendimiento cultivadas en la región de Ayacucho, con el fin de identificar combinaciones agronómicas eficientes incluso bajo condiciones de limitada disponibilidad de insumos químicos.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

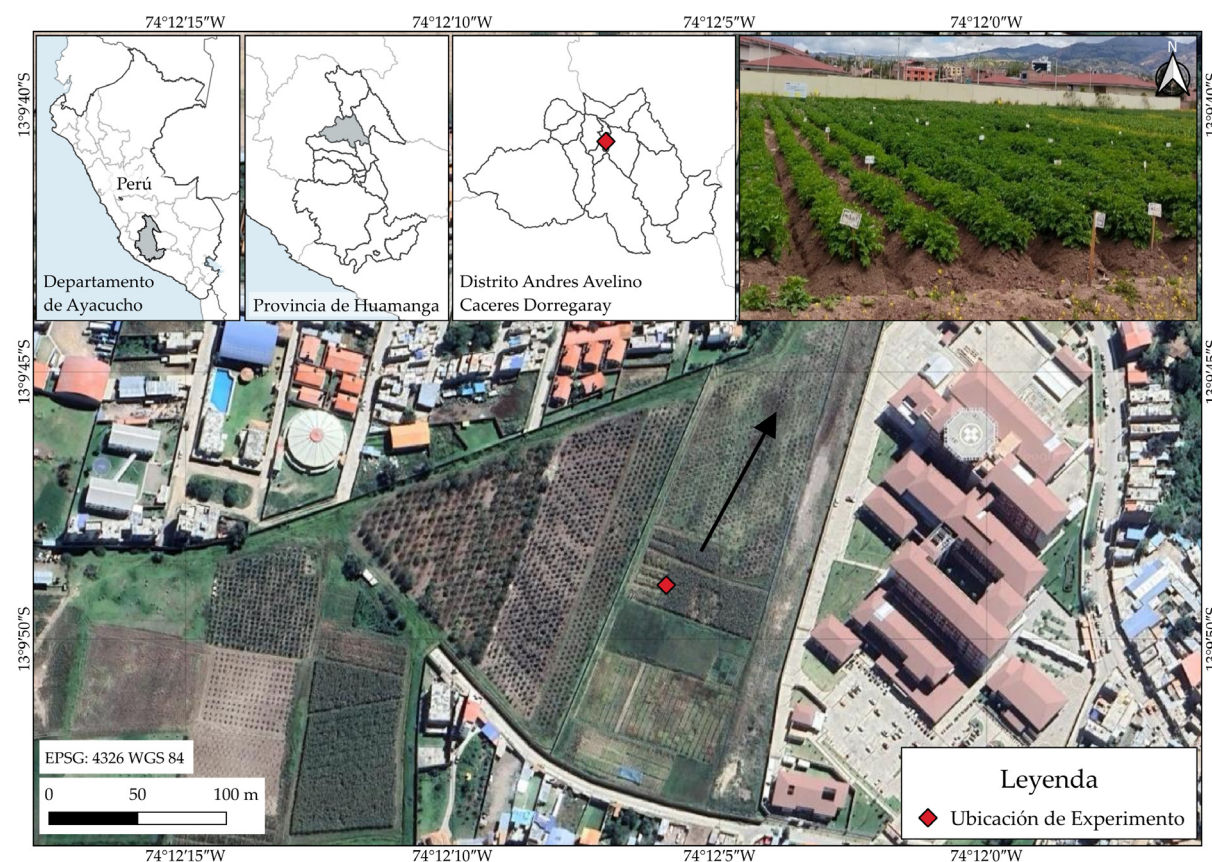
El estudio se realizó en la campaña agrícola 2024-2025 en una parcela de 972 m<sup>2</sup> ubicada en Viscachayoc (74° 12' 7" W y 13°4' 48" S; 2727.201 m s.n.m.) perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), distrito Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, provincia de Huamanga, Ayacucho, Perú (Figura 1).

### Características Climáticas del Área Experimental

El estudio se realizó entre noviembre de 2024 y abril de 2025, registrando condiciones ambientales claves. El estudio se realizó entre noviembre de 2024 y abril de 2025, registrando condiciones ambientales claves. La temperatura media del aire descendió gradualmente de 17.6°C en noviembre a 15.5 °C en abril, con extremos de 8.8°C y 28.9 °C y la humedad relativa aumentó de forma sostenidamente de 59.5%–78.6%. Aunque la precipitación diaria apenas promedio 0.1–0.2 mm, se registraron eventos puntuales de 15.4 mm febrero y 9.8 mm en diciembre. Todos los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica INIA-Canaán por SENAMHI y Gobierno regional de Ayacucho.

### Características del suelo

Previamente a la instalación del ensayo, se recolectaron muestras de suelo a una profundidad de 0 a 40 cm, y se realizó el análisis correspondiente en el Laboratorio de Suelos, Agua y Foliare (LABSAF) de la Estación Experimental Agraria Canaán – INIA.



**Figura 1.** Ubicación del campo experimental. Los ensayos en campo se realizaron en las parcelas pertenecientes al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), distrito Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, provincia de Huamanga, Ayacucho, Perú.

Los parámetros del suelo evaluados incluyeron: textura del suelo, pH (Neina, 2019), conductividad eléctrica (Molua, 2021), contenido de materia orgánica (King et al., 2020), nitrógeno total N (Ali et al., 2017), fósforo disponible (Mwende, 2019), potasio disponible (Xu et al., 2020) y concentración de cationes intercambiables (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características fisicoquímicas del suelo.

Variable	Unidades	Resultado
Arena	%	27.77
Lima	%	43.67
Arcilla	%	29.55
Textura	–	Suelo franco arcilloso
pH	–	7.2
Conductividad Eléctrica	Sm.m-1	17.3
Materia Orgánica	%	2.2
N	%	0.11
P	Ppm	29.5
K	Ppm	422.5
Ca	Cmol (+).kg-1	48.5
Mg	Cmol (+).kg-1	10.75
k	Cmol (+).kg-1	2.64
Na	Cmol (+).kg-1	0.51
CCE	Cmol (+).kg-1	62.41

### Material genético

Se evaluaron dos cultivares de papa INIA 303-Canchan y Yungay, que presentan diferencias agronómicas resaltantes. INIA 303-Canchan exhibe un ciclo de maduración intermedio 120 dds (días después de la siembra), con un rendimiento promedio de 30 t/ha y resistencia horizontal a *Phytophthora infestas* (Reyes et al., 2019). En contraste, la variedad Yungay posee un ciclo largo 170-180 dds y posee un potencial de rendimiento de hasta 45t/ha, Además, muestra tolerancia a la sequía y patógenos como *Streptomyces scabies* (Karagoz et al., 2024), *Phytophthora erythroseptica* (Çakır et al., 2020) y *globodera ssp* (Gartner et al., 2024), aunque es susceptible a la *Phytophthora infestas* (Gastelo et al., 2021).

### Diseño experimental

El experimento se condujo bajo un diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial 3×3×2 y tres repeticiones por tratamiento,

sumando un total de 54 unidades experimentales. Se evaluaron tres niveles de inoculación microbiana: control sin inocular ( $m_1$ ), *Trichoderma viride* ( $m_2$ ) y *Bacillus subtilis* ( $m_3$ ); tres niveles de fertilización organomineral: 0 % ( $n_1$ ), 50 % ( $n_2$ ) y 100 % ( $n_3$ ); y dos cultivares de papa: Yungay e INIA 303-Canchan. Las combinaciones de tratamientos se asignaron al azar a las parcelas individuales, que medían 15 m<sup>2</sup> (3 surcos de 5 m de longitud, con una separación de 1 m entre surcos y 0,30 m entre plantas). Cabe señalar que los cultivares se evaluaron en parcelas separadas, pero se analizaron conjuntamente bajo un enfoque factorial (tabla 2).

**Tabla 2.** Combinaciones de los factores 3x3x2 generando 18 tratamientos.

Cultivar	Microorganismos	Niveles	Combinaciones
Canchán	Uninoculated (control)	0%	$m_1 \times n_1 \times v_1$
Canchán	Uninoculated (control)	50%	$m_1 \times n_2 \times v_1$
Canchán	Uninoculated (control)	100%	$m_1 \times n_3 \times v_1$
Canchán	<i>Trichoderma viride</i>	0%	$m_2 \times n_1 \times v_1$
Canchán	<i>Trichoderma viride</i>	50%	$m_2 \times n_2 \times v_1$
Canchán	<i>Trichoderma viride</i>	100%	$m_2 \times n_3 \times v_1$
Canchán	<i>Bacillus subtilis</i>	0%	$m_3 \times n_1 \times v_1$
Canchán	<i>Bacillus subtilis</i>	50%	$m_3 \times n_2 \times v_1$
Canchán	<i>Bacillus subtilis</i>	100%	$m_3 \times n_3 \times v_1$
Yungay	Uninoculated (control)	0%	$m_1 \times n_1 \times v_2$
Yungay	Uninoculated (control)	50%	$m_1 \times n_2 \times v_2$
Yungay	Uninoculated (control)	100%	$m_1 \times n_3 \times v_2$
Yungay	<i>Trichoderma viride</i>	0%	$m_2 \times n_1 \times v_2$
Yungay	<i>Trichoderma viride</i>	50%	$m_2 \times n_2 \times v_2$
Yungay	<i>Trichoderma viride</i>	100%	$m_2 \times n_3 \times v_2$
Yungay	<i>Bacillus subtilis</i>	0%	$m_3 \times n_1 \times v_2$
Yungay	<i>Bacillus subtilis</i>	50%	$m_3 \times n_2 \times v_2$
Yungay	<i>Bacillus subtilis</i>	100%	$m_3 \times n_3 \times v_2$

### Manejo del cultivo y fertilización

Las semillas utilizadas correspondieron a la categoría registrada de las variedades Yungay e INIA 303-Canchán, suministradas por el Proyecto de Semillas (PROSEM). La siembra se efectuó el 12 de noviembre del 2024 con dos semillas por golpe espaciadas a 0.3m. El cultivo se instaló en los periodos próximos de lluvia y campaña agrícola.

Durante la etapa vegetativa se controlaron *Epicauta willei*, *Phthorimaea operculella* y *Epitrix yanzara*

con el ingrediente activo Alfa-Cipermetrina a una concentración de 60 ml/20 L. Para controlar ataques de patógenos sólo se realizó el control biológico con *Trichoderma* y *Bacillus*. La cosecha se realizó a los 130 días después de siembra (dds) para las 2 variedades trabajadas. La fertilización se realizó en base al análisis de suelo y los requerimientos nutricionales del cultivo de papa. Se utilizó urea como fuente de nitrógeno: una parte 175kg/ha a la siembra y la otra 175kg/ha al primer aporte, adicionalmente se aplicaron 400 kg/ha de fosfato diamónico (DAP) y 200 kg/ha de cloruro de potasio (KCl) en el momento de la siembra. Estos insumos sirvieron como fuentes de N-P-K en tres niveles: 0 %, 50 % y 100 % de la dosis.

#### Inoculación de microorganismos

Se utilizaron *Bacillus subtilis* AP-01 marca (Silvestre) a una concentración de  $1 \times 10^9$  ufc/g (unidades formadoras de conidios) en presentación de polvo mojable y con registro de Senasa-PBUA N°176, mientras que el hongo *Trichoderma viride* procedente de la marca (Solagro) fue impregnado en maíz estéril (granos de maíz esporulado) a concentración de  $1 \times 10^{12}$  conidios /kg- con registro Senasa-PBUA N° 393. Durante la instalación del experimento se prepararon los inoculantes de *Bacillus* y *Trichoderma* usando sus dosis recomendadas por el fabricante de (20 g de *Bacillus* por 15 L de agua y 30 g de *Trichoderma* por 15 L, impregnado en maíz partido). A cada solución se añadió aceite agrícola para proteger al microorganismo de la radiación solar y melaza como fuente de carbohidratos (2 L por unidad experimental). Posteriormente, se asperjó la mezcla directamente sobre los tubérculos colocados en surcos abiertos, los cuales se taparon inmediatamente tras la aplicación. Este procedimiento se aplicó tanto a INIA 303-Canchán como a Yungay durante el periodo de prealba, con el objetivo de minimizar la mortalidad del inoculante, cabe señalar que los tubérculos se sembraron sin desinfectar, es decir no se usó bactericidas ni fungicidas. (Hao et al., 2024; Attia et al., 2025).

#### Variables agronómicas

A los 120 días después de la siembra (dds), coincidiendo con la madurez fisiológica del cultivo, se procedió a determinar el peso fresco de los tubérculos

por planta utilizando una balanza de precisión (MEDILAB®). Tras la cosecha, los tubérculos fueron clasificados por calibre, siguiendo lo establecido en la Ley General de semilla N° 27262 bajo el reglamento específico de semillas de papa con (Decreto Supremo N° 010-2018-MINAGRI), en tres categorías: primera (PC1: 70–120 g), segunda (PC2: 40–69 g) y tercera (PC3: 20–39 g). Para cada unidad experimental se registró el peso total (kg) correspondiente a cada categoría.

#### Análisis estadístico

Los datos fueron procesados en RStudio (v. 2024.12.1 + 563). Se inició con una exploración preliminar mediante el paquete dplyr (Wickham et al., 2023). Dado que las variables analizadas no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se aplicó ANOVA robusto utilizando la librería WRS2 (Mair y Wilcox 2023). Las comparaciones de medias se realizaron mediante el ajuste de Sidák usando la función RHSDB. Además, se utilizó emmeans (Lenth, 2023) para estimar medias marginales y contrastes post hoc, y multcomp (Hothorn et al., 2008) para ejecutar comparaciones múltiples y visualizar significancias estadísticas.

### III. RESULTADOS

#### Resultado para peso de tubérculo por planta (WTP)

Para el ANOVA- WRS2 evidenció diferencias altamente significativas para los tratamientos  $p > 0.001$ , pero no se identificaron diferencias significativas para la variedad ni para la interacción variedad x tratamiento ( $p > 0.05$ ). Esto nos da entender que el peso de los tubérculos por planta de papa fue afectado únicamente y principalmente por los tratamientos aplicados a cada unidad experimental, esto independientemente del tipo variedad de papa instalada. Las comparaciones múltiples de medias por el método Sidak identificaron ( $\alpha = 0.05$ ). El tratamiento con mayor peso promedio de tubérculos por planta fue en el tratamiento  $m1 \times n3$  ( $2.043 \pm 0.13$  kg) seguida sin diferencia estadística por  $m2 \times n3$  ( $1.92 \pm 0.13$  kg), mientras que la peor performance se obtuvo en el tratamiento  $m2 \times n1$  ( $0.87 \pm 0.14$  kg), cabe resaltar que el tratamiento con *Bacillus* y sin ninguna fertilización  $m3 \times n1$  ( $1.21 \pm 0.14$  kg) superó a los otros tratamientos sin fertilización como  $m2 \times n1$  y  $m1 \times n1$

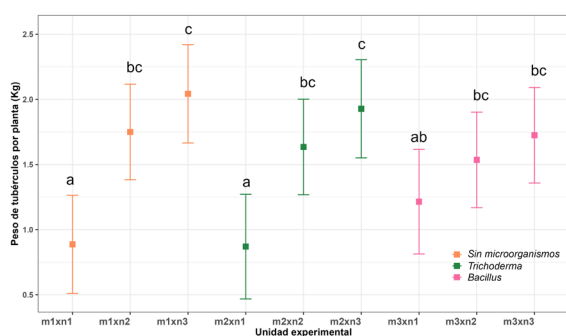
con  $0.87 \pm 0.14$  kg y  $0.88 \pm 0.14$  kg, respectivamente (Figura 2)

**Resultados para categorías primera, segunda y tercera**

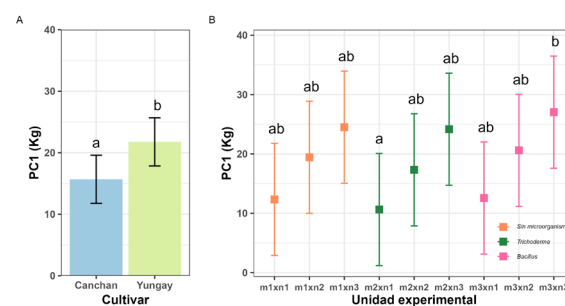
El ANOVA robusto (WRS2) para la categoría primera (PC1) mostró efectos significativos tanto para la variedad ( $p = 0.009$ ) como para los tratamientos ( $p = 0.043$ ), mientras que la interacción variedad  $\times$  tratamiento no fue significativa ( $p = 0.965$ ), lo que indica una respuesta varietal consistente. Se evidenció un mayor incremento en la producción de semilla de primera en la variedad. Yungay con  $21.8 \pm 1.48$  kg, en comparación con INIA 303-Canchán, que alcanzó  $15.7 \pm 1.48$  kg (Figura 3A). El análisis de comparaciones múltiples mediante la prueba de Sidak reveló que el tratamiento  $m3xn3$  ( $27.0 \pm 3.25$  kg) alcanzó el mayor peso promedio, seguido de  $m1xn3$  ( $24.5 \pm 3.25$  kg) y  $m2xn3$  ( $24.16 \pm 3.25$  kg). El tratamiento con menor rendimiento para categoría primera (PC1) fue  $m2xn1$  de  $10.63 \pm 3.25$  kg (Figura 3 B).

Los resultados del análisis de varianza ANOVA-

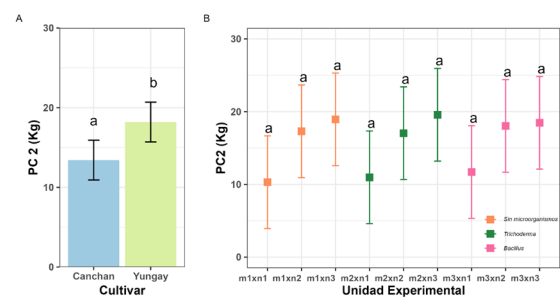
WRS2 para la semilla categoría segunda (PC2) indicaron efectos significativos por la variedad ( $p=0.002$ ) y los tratamientos ( $p= 0.038$ ). No se observó interacción significativa entre las variedades  $\times$  tratamiento ( $p=0.968$ ), lo que sugiera una respuesta más por variedad. El contraste entre variedades mostro que Yungay ( $18.2 \pm 1.08$  kg) alcanzo un peso de tubérculos de segunda estadísticamente superior en comparación con INIA 303-Canchan ( $13.4 \pm 1.08$  kg) (Figura 4 A). En cuanto a los tratamientos, no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre ellos. El tratamiento  $m2xn3$  ( $19.6 \pm 2.19$  kg) obtuvo el mayor peso en semillas de segunda, seguido por  $m1xn3$  con ( $18.9 \pm 2.19$  kg) y  $m3xn3$  con ( $18.5 \pm 2.19$  kg), mientras que el resultado más inferior fue tratamiento  $m1xn1$  con  $10.3 \pm 2.19$  kg (Figura 4 B). Por último; para la semilla categoría tercera PC3 mostro que la variedad ( $p= 0.008$ ) como el tratamiento ( $p=0.015$ ) tuvieron un efecto significativo sobre el peso de tubérculos. Sin embargo, no se observó interacción significativa variedad  $\times$  tratamiento ( $p= 0.790$ ) lo que sugiere que la respuesta varietal fue consistente independiente del manejo. La variedad Yungay



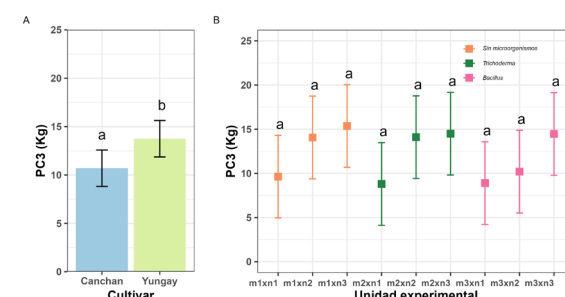
**Tabla 2.** Comparaciones de medias para el peso de los tubérculos (kg) por planta las combinaciones de variedad canchan y Yungay, letras indican grupos estadísticamente según la prueba de Sidak  $p < 0.05$ .



**Tabla 3.** Comparaciones de medias para peso de semilla de primera categoría (PC1) las combinaciones de variedad canchan y Yungay, letras indican grupos estadísticamente según la prueba de Sidak  $p < 0.05$ .



**Tabla 4.** Comparaciones de medias para peso de semilla de segunda categoría (PC2) las combinaciones de variedad canchan y Yungay, letras indican grupos estadísticamente según la prueba de Sidak  $p < 0.05$ .



**Tabla 5.** Comparaciones de medias para () las combinaciones de variedad canchan y Yungay, letras indican grupos estadísticamente según la prueba de Sidak  $p < 0.05$ .

( $13.7 \pm 0.81$  kg) superó en producción de semilla de tercera categoría a INIA 303-Canchán ( $10.7 \pm 0.81$  kg) (Figura 5A). A pesar que en los tratamientos no se observaron diferencias significativas  $m_1 \times n_3$  con ( $15.4 \pm 1.6$  kg) seguidas de  $m_2 \times n_3$  con ( $14.5 \pm 1.6$  kg) y el  $m_3 \times n_3$  ( $14.46 \pm 1.6$  kg) mostraron el mayor peso tubérculos de tercera, mientras que el de menor peso de tercera fue  $m_2 \times n_1$  con  $8.8 \pm 1.6$  kg (Figura 5 B).

#### IV. DISCUSION

El presente estudio confirma que la nutrición mineral equilibrada sigue siendo el factor predominante que determina el rendimiento de tubérculos en sistemas de papa de altura andina; sin embargo, la incorporación estratégica de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM) puede modificar de forma apreciable esa respuesta y, en escenarios de bajos insumos, compensar parcialmente la reducción de fertilizantes.

##### Biomasa total de tubérculos

El mayor peso de tubérculos por planta se obtuvo con la fertilización completa ( $m_1 \times n_3$ ,  $2.04 \pm 0.13$  kg), ratificando la fuerte dependencia de la papa de un suministro adecuado de NPK (Abebe et al., 2022; Koch et al., 2020). No obstante, la inoculación con *Bacillus subtilis* sin aporte mineral ( $m_3 \times n_1$ ,  $1.21 \pm 0.14$  kg) superó tanto al tratamiento con *Trichoderma* sin fertilizante ( $m_2 \times n_1$ ,  $0.87 \pm 0.14$  kg) como al control absoluto ( $m_1 \times n_1$ ,  $0.88 \pm 0.14$  kg). Este incremento se asocia con la capacidad de *B. subtilis* para movilizar nutrientes y sintetizar fitohormonas que estimulan la expansión del sistema radicular (Petkova et al., 2024; Blake et al., 2021).

##### Distribución de calibres

El calibre de semilla de papa fue más sensible a la interacción nutrientes-PGPM que el rendimiento global. En la categoría de mayor valor comercial (PC1, 70–120 g), el tratamiento  $m_3 \times n_3$  fertilización completa + *B. subtilis* registró el peso más alto, seguido del tratamiento sólo fertilizado ( $m_1 \times n_3$ ). Ello revela un efecto sinérgico: el fertilizante asegura la oferta de asimilados, mientras que *Bacillus* favorece la partición hacia menos tubérculos pero de mayor tamaño (Arif et al., 2020; Ning et al., 2023; Muhammad et al.,

2025). En PC2 y PC3 la fertilización siguió siendo decisiva; no obstante, *B. subtilis* y *Trichoderma* mantuvieron ventajas particularmente en PC2 incluso con dosis reducidas de NPK, subrayando su utilidad para mejorar los calibres intermedios (Mehmood et al., 2021). En PC3, los tratamientos exclusivamente fertilizados obtuvieron el mayor peso, posiblemente por un estímulo fisiológico de la tuberización secundaria inducido por el NPK (Kumar et al., 2022). Esto sugiere que la fertilización química por sí sola puede estimular el desarrollo de un mayor número de tubérculos pequeños, posiblemente debido a la ausencia de señales hormonales o simbióticas proporcionadas por microorganismos benéficos.

##### Diferencias varietales

Yungay superó a INIA 303-Canchán en un 39 % (PC1), 36 % (PC2) y 28 % (PC3). Su ciclo más prolongado (170–180 días) permite una mayor acumulación de foto asimilados y, por ende, mayor capacidad como sumidero. La ausencia de interacción variedad  $\times$  PGPM indica que ambas cultivares responden positivamente a los microorganismos, aunque la magnitud de dicha respuesta depende de su potencial genético y duración del ciclo (Hao et al., 2024; Jensen et al., 2024; De Lima et al., 2024). Además, un mayor peso de semilla conlleva más reservas, lo que se traduce en un rendimiento potencial superior (Hirpa et al., 2010; Bist et al., 2023).

##### Implicaciones para la sostenibilidad

Incorporar *B. subtilis* al programa de fertilización permitiría reducir gradualmente las dosis de NPK sin sacrificar los calibres comerciales, un objetivo prioritario en laderas andinas donde la eficiencia del fertilizante rara vez supera el 40 % (Maaz et al., 2025). Aunque el impacto directo de *Trichoderma* sobre el rendimiento fue moderado, su eficacia comprobada en el control de patógenos y en la mejora de la salud del suelo (Nadeem et al., 2021; Purwantisari et al., 2022), justifica su inclusión. Un consorcio que combine ambos PGPM proporcionaría beneficios complementarios: *Bacillus* para la movilización de nutrientes y la regulación hormonal; *Trichoderma* para el biocontrol y el acondicionamiento de la rizosfera.

## V. CONCLUSIONES

La combinación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM) con distintos niveles de fertilización tuvo un efecto significativo sobre el peso de tubérculos por planta, independientemente de la variedad evaluada. El tratamiento m1×n3 (fertilización completa sin microorganismos) alcanzó el mayor peso de tubérculos por planta, seguido sin diferencia estadística significativa por m2×n3 (*Trichoderma* + 100% NPK), lo que evidencia que la fertilización completa es clave, y que su efecto puede potenciarse con la incorporación de PGPM.

La incorporación de *Bacillus subtilis* mostro un efecto positivo incluso sin fertilización, superando a otros tratamientos y destacándose como alternativa biotecnológica viable en escenarios de baja disponibilidad de insumos. En cuanto a la calidad comercial, la variedad Yungay superó de forma consistente a INIA 303- Canchán en todas las categorías, con un rendimiento sobresaliente en semilla de primera (PC1). El tratamiento m3×n3 (*Bacillus* + 100% NPK) logró el mayor rendimiento en esta categoría, seguido por m1×n3 y m2×n3, lo que demuestra una sinergia clara entre inoculantes y fertilización.

Estos resultados respaldan el uso integrado de PGPM y fertilización química para optimizar el rendimiento y calidad de semilla en condiciones agroecológicas andinas. Se recomienda a los productores adoptar esquemas de fertilización con inoculación de *Trichoderma* o *Bacillus*, priorizando según disponibilidad local y costos. Además, se sugiere validar los tratamientos evaluados en diferentes pisos altitudinales, campañas y tipos de suelo, para consolidar modelos tecnológicos adaptados a las condiciones de la región andina.

La integración de biofertilizantes con prácticas nutricionales sostenibles no solo optimiza la productividad y calidad de semilla, sino que también fortalece la resiliencia frente al cambio climático y reduce la dependencia de insumos químicos. Esta línea de trabajo ofrece amplias posibilidades para

desarrollar tecnologías apropiadas orientadas a la producción ecológica y certificada de semilla de papa en el Perú.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización: M.T. y G.P. metodología: M.T. y G.P. Validación: J.V. Análisis formal: M.T.; Investigación: M.T. Recursos: J.V. Depuración de datos: D.M. Redacción del borrador original: M.T. y D.M. Redacción, revisión y edición: D.M. Visualización: D.M. Supervisión: O.P. Administración del proyecto: O.P.

## VI. REFERENCIAS

- Abebe, T. G., Tamtam, M. R., Abebe, A. A., Abtemariam, K. A., Shigut, T. G., Dejen, Y. A., & Haile, E. G. (2022). Growing Use and Impacts of Chemical Fertilizers and Assessing Alternative Organic Fertilizer Sources in Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2022, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2022/4738416>
- Adekanmbi, T., Wang, X., Basheer, S., Liu, S., Yang, A., & Cheng, H. (2024). Climate change impacts on global potato yields: A review. *Environmental Research: Climate*, 3(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad0e13>
- Ahmadu, T., Abdullahi, A., & Ahmad, K. (2021). The Role of Crop Protection in Sustainable Potato (*Solanum tuberosum* L.) Production to Alleviate Global Starvation Problem: An Overview. En M. Yildiz & Y. Ozgen. *Solanum tuberosum A Promising Crop for Starvation Problem*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100058>
- Akhtyamova, Z., Arkhipova, T., Martynenko, E., Nuzhnaya, T., Kuzmina, L., Kudoyarova, G., & Veselov, D. (2021). Growth-Promoting Effect of Rhizobacterium (*Bacillus subtilis* IB22) in Salt-Stressed Barley Depends on Abscisic Acid Accumulation in the Roots. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(19), 10680. <https://doi.org/10.3390/>



- ijms221910680
- Ali, A. A., Abd El-Kader, A. E., & Ghoneem, K. M. (2017). Two *trichoderma* species and *Bacillus subtilis* as biocontrol agents against rhizoctonia disease and their influence on potato productivity. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 95(2), 527-541. <https://doi.org/10.21608/ejar.2017.147354>
- Amin, H. A., El Kammar, H. F., Saied, S. M., & Soliman, A. M. (2023). Effect of *Bacillus subtilis* on potato virus Y (PVY) disease resistance and growth promotion in potato plants. *European Journal of Plant Pathology*, 167(4), 743-758. <https://doi.org/10.1007/s10658-023-02774-0>
- Arif, I., Batool, M., & Schenk, P. M. (2020). Plant Microbiome Engineering: Expected Benefits for Improved Crop Growth and Resilience. *Trends in Biotechnology*, 38(12), 1385-1396. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.04.015>
- Aseel, D. G., Soliman, S. A., Al-Askar, A. A., Elkelish, A., Elbeaino, T., & Abdelkhalek, A. (2023). *Trichoderma viride* Isolate Tvd44 Enhances Potato Growth and Stimulates the Defense System against Potato Virus Y. *Horticulturae*, 9(6), 716. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060716>
- Ashitha., R., & Mathew, J. (2021). Fate of the conventional fertilizers in environment. En *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture* (pp. 25-39). *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819555-0.00002-9>
- Attia, M. S., El-Wakil, D. A., Hashem, A. H., Al-Askar, A. A., AbdElgawad, H., Alotaibi, R. S., Abdel-Kader, Saad. A., & Abdelaziz, A. M. (2025). Investigating the activity of *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* to mitigate Fusarium wilt disease of diverse cultivars of *Vicia faba*. *Scientific Reports*, 15(1), 16093. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99381-2>
- Bist, L., Sharma, R., & Thakurathi, B. (2023). Effect of Seed Tuber Size on Growth and Yield of Potato (*Solanum Tuberosum* L.) Variety Desiree in Dadel dhura. *Contemporary Research: An Interdisciplinary Academic Journal*, 6(2), 110–123. <https://doi.org/10.3126/craiaj.v6i2.60251>
- Blake, C., Christensen, M. N., & Kovács, Á. T. (2021). Molecular Aspects of Plant Growth Promotion and Protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), 15-25. <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>
- Çakır, E., Ertek, T. S., Katircioğlu, Y. Z., & Maden, S. (2020). Occurrence of potato pink rot caused by *Phytophthora erythroseptica* in Turkey, with special reference to *Phytophthora cryptogea*. *Australasian Plant Disease Notes*, 15(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s13314-020-0379-9>
- Camire, M. E., Kubow, S., & Donnelly, D. J. (2009). Potatoes and Human Health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(10), 823-840. <https://doi.org/10.1080/10408390903041996>
- Campos, H., & Ortiz, O. (2020). The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind. *Springer Nature*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-286835>
- Conley, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot, C., & Likens, G. E. (2009). Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 323(5917), 1014–1015. <https://doi.org/10.1126/science.1167755>
- Das, P. P., Singh, K. R., Nagpure, G., Mansoori, A., Singh, R. P., Ghazi, I. A., Kumar, A., & Singh, J. (2022). Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*, 214, 113821. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113821>
- De Lima Gonilha, D. B., Santos, C. H. B., Frezarin,

- E. T., Siqueira, J. S., & Rigobelo, E. C. (2024). Biological Strategies to Minimize Fertilizer Use in Maize: Efficacy of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis*. *Microbiology Research*, 15(4), 2261-2273. <https://doi.org/10.3390/microbiolres15040151>
- El-Daim, I. A. A., & Meijer, J. (2019). *Bacillus velezensis* 5113 Induced Metabolic and Molecular Reprogramming during Abiotic Stress Tolerance in Wheat. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52567-x>
- Gartner, U., Armstrong, M. R., Sharma, S. K., Jones, J. T., Blok, V. C., Hein, I., & Bryan, G. J. (2024). Characterisation and mapping of a *Globodera pallida* resistance derived from the wild potato species *Solanum spegazzinii*. *Theoretical and Applied Genetics*, 137(5), 106. <https://doi.org/10.1007/s00122-024-04605-0>
- Gastelo, M., Burgos, G., Bastos, C., Perez, J. M., Otiniano, R., Cabrera, H., Canto, R., De Scurrah, M. M., & Felde, T. Z. (2021). Identification of Elite Potato Clones with Resistance to Late Blight Through Participatory Varietal Selection in Peru. *Potato Research*, 64(4), 611-634. <https://doi.org/10.1007/s11540-021-09495-z>
- Hao, J., Wang, Z., Zhao, Y., Feng, S., Cui, Z., Zhang, Y., Wang, D., & Zhou, H. (2024). Inhibition of Potato Fusarium Wilt by *Bacillus subtilis* ZWZ-19 and *Trichoderma asperellum* PT-29: A Comparative Analysis of Non-Targeted Metabolomics. *Plants*, 13(7), 925. <https://doi.org/10.3390/plants13070925>
- Heflish, A. A., Abdelkhalek, A., Al-Askar, A. A., & Behiry, S. I. (2021). Protective and Curative Effects of *Trichoderma asperelloides* Ta41 on Tomato Root Rot Caused by *Rhizoctonia solani* Rs33. *Agronomy*, 11(6), 1162. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061162>
- Hirpa, A., Meuwissen, M. P., Tesfaye, A., Lommen, W. J., Oude Lansink, A., Tsegaye, A., & Struik, P. C. (2010). Analysis of seed potato systems in Ethiopia. *American journal of potato research*, 87, 537-552. <https://doi.org/10.1007/s12230-010-9164-1>
- Hothorn, T., Bretz, F & Westfall, P. (2008). Multcomp [Software]. <https://cran.r-project.org/web/packages/multcomp/index.html>
- Iqbal, S., Ashfaq, M., Rao, M. J., Khan, K. S., Malik, A. H., Mehmood, M. A., Fawaz, M. S., Abbas, A., Shakeel, M. T., Naqvi, S. A. H., Alrefaei, A. F., & Duan, M. (2024). *Trichoderma viride*: An Eco-Friendly Biocontrol Solution Against Soil-Borne Pathogens in Vegetables Under Different Soil Conditions. *Horticulturae*, 10(12), 1277. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121277>
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., & Cosby, B. J. (2003). The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53(4), 341-356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- Jensen, C. N. G., Pang, J. K. Y., Gottardi, M., Kračun, S. K., Svendsen, B. A., Nielsen, K. F., Kovács, Á. T., Moelbak, L., Fimognari, L., Husted, S., & Schulz, A. (2024). *Bacillus subtilis* promotes plant phosphorus (P) acquisition through P solubilization and stimulation of root and root hair growth. *Physiologia Plantarum*, 176(3), e14338. <https://doi.org/10.1111/ppl.14338>
- Karagoz, K., Dadasoglu, F., Alaylar, B., & Kotan, R. (2024). Evaluation of molecular typing methods for some scab-causing *Streptomyces strains* from Turkey. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40(4), 122. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-03914-2>
- King, A. E., Ali, G. A., Gillespie, A. W., & Wagner-Riddle, C. (2020). Soil Organic Matter as Catalyst of Crop Resource Capture. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 50. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00050>
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., & Thiel, H. (2020). The Importance of

- Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Research*, 63(1), 97-119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>
- Kumar, R., Prakash, S., Luthra, S. K., Singh, B., Chand, P., Kumar, V., Singh, R., & Alam, K. (2022). Analysis of Correlation and Path coefficient among the Yield and Yield Attributes Characters in Potato (*Solanum tuberosum* L.). in *biol* (vol14 pp. 916-922)
- Lenth (2023). Emmeans (Versión 1.8.6). <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/index.html>
- Maaz, T. M., Dobermann, A., Lyons, S. E., & Thomson, A. M. (2025). Review of research and innovation on novel fertilizers for crop nutrition. *Npj Sustainable Agriculture*, 3(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00066-0>
- Machida-Hirano, R. (2015). Diversity of potato genetic resources. *Breeding science*, 65(1), 26-40. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.65.26>
- Mair, P. & Wilcox, R. (2023). WRS2 (Versión 1.1-4). <https://cran.r-project.org/web/packages/WRS2/index.html>
- Mehmood, S., Muneer, M. A., Tahir, M., Javed, M. T., Mahmood, T., Afridi, M. S., Pakar, N. P., Abbasi, H. A., Munis, M. F. H., & Chaudhary, H. J. (2021). Deciphering distinct biological control and growth promoting potential of multi-stress tolerant *Bacillus subtilis* PM32 for potato stem canker. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(9), 2101-2114. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01067-2>
- MIDAGRI. (2024). Compendio anual de "Producción Agrícola. Gobierno del Perú.
- Molua, C. O. (2021). Investigating the Influence of Soil Electrical Conductivity on Crop Yield for Precision Agriculture Advancements. *International Journal of Agriculture and Animal Production*, 12, 23-34. <https://doi.org/10.55529/ijaap.12.23.34>
- Muhammad, H., Ijaz, M., Sattar, A., Ul-Allah, S., Sher, A., Asif, M., Dilshad, M., Mahmood, K., Riaz, M. W., Zaheer, M. S., Rizwan, M., & Manoharadas, S. (2025). Synergistic effects of PGPRs and fertilizer amendments on improving the yield and productivity of Canola (*Brassica napus* L.). *BMC Plant Biology*, 25(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06062-3>
- Mwende Muindi, E. (2019). Understanding Soil Phosphorus. *International Journal of Plant & Soil Science*, 1-18. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2019/v3i1i230208>
- Nadeem, A., Hussain, S., Saeedullah, S., Akbar, A., Ahmad, Z., Tariq, M., Karim, R., & Huzaifa, M. (2021). Effect of Different Levels of Soil Moisture and *Trichoderma Viride* in Controlling Black Scurf of Potato. *Sarhad Journal of Agriculture*, 38(1). <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2022/38.1.40.45>
- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Ning, L., Xu, X., Qiu, S., Lei, Q., Zhang, Y., Luo, J., Ding, W., Zhao, S., He, P., & Zhou, W. (2023). Balancing potato yield, soil nutrient supply, and nitrous oxide emissions: An analysis of nitrogen application trade-offs. *Science of The Total Environment*, 899, 165628. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165628>
- Pérez, C. R. S. (2024). Boletín mensual. Valor bruto de la producción agropecuaria. 1-7.
- Petkova, M., Marcheua, M., Petrova, A.-L., Slavova, V., & Shilev, S. (2024). Plant Growth-Promoting and Biocontrol Characteristics of Four *Bacillus Strains* and Evaluation of Their Effects on Wheat (Tr. Aestivum L.). *International Journal of Plant Biology*, 16(1), 1. <https://doi.org/10.3390/ijpb16010001>
- Purwantisari, S., Ferniah, R. S., Nurchayati, Y., & Jannah, S. N. (2022). Effects of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and

- Trichoderma* sp. On Potato Growth on Medium Plains. *Life Sciences*. <https://doi.org/10.18502/cls.v7i3.11157>
- Rakibuzzaman, M., Akand, M. H., Siddika, M., & Uddin, A. F. M. J. (2021). Impact of *Trichoderma* application as bio-stimulator on disease suppression, growth and yield of potato. *Journal of Bioscience and Agriculture Research*, 27(01), 2252-2257. <https://doi.org/10.18801/jbar.270121.274>
- Reay, D. S., Davidson, E. A., Smith, K. A., Smith, P., Melillo, J. M., Dentener, F., & Crutzen, P. J. (2012). Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Climate Change*, 2(6), 410–416. <https://doi.org/10.1038/nclimate1458>
- Reyes, J., Alania, D., Ninalaya, E., Gastelo, N., Bastos, C (2019). Nuevos cultivares de papa con resistencia a la ranca (*Phytophthora infestans*) y adaptación al cambio climático. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 22(2), 66-82. <https://doi.org/10.37066/ralap.v22i2.305>
- Saini, I., Kaushik, P., Al-Huqail, A. A., Khan, F., & Siddiqui, M. H. (2021). Effect of the diverse combinations of useful microbes and chemical fertilizers on important traits of potato. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), 2641-2648. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.070>
- Smith, V. H., Tilman, D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179-196. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(99)00091-3)
- Spooner, D. M., McLean, K., Ramsay, G., Waugh, R., & Bryan, G. J. (2005). A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(41), 14694-14699. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507400102>
- Wickham, H., Francois, R., Henry, L., & Muller. (2023) Dplyr. <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>
- Woo, S. L., Hermosa, R., Lorito, M., & Monte, E. (2023). *Trichoderma*: A multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 21(5), 312-326. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5>
- Xu, X., Du, X., Wang, F., Sha, J., Chen, Q., Tian, G., Zhu, Z., Ge, S., & Jiang, Y. (2020). Effects of Potassium Levels on Plant Growth, Accumulation and Distribution of Carbon, and Nitrate Metabolism in Apple Dwarf Rootstock Seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11, 904. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904>.