

Productividad y tamaño de grano en el cultivo de la quinua bajo la aplicación de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química en el municipio de Silvia, Cauca, Colombia

Duque Hoyos Natalia Andrea

UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE CIENCIAS INGENIERÍA, DISEÑO Y CIENCIAS APLICADAS
MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOTECNOLOGÍA
Santiago de Cali, Valle del Cauca

2024

Productividad y tamaño de grano en el cultivo de la quinua bajo la aplicación de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química en el municipio de Silvia, Cauca, Colombia

Duque Hoyos Natalia Andrea

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE
MAGISTER EN CIENCIAS BIOTECNOLOGÍA

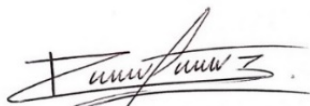
Director de tesis
MSc. Daniel Fernando Ortiz González
Investigador máster AGROSAVIA

Santiago de Cali, Valle del Cauca

2024

**FIRMAS DE AVAL DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL TRABAJO
DE GRADO II**

Firma Aval del Asesor: MSc. Daniel Fernando Ortiz González.



Nombre del Asesor

Firma del estudiante: Biól. Natalia Andrea Duque Hoyos.



Nombre del Estudiante

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por guiarme y darme fortaleza durante todo este camino académico.

A mis padres, Sir Lover Duque Bernal y Ruby Hoyos Gaviria, quienes han sido mi inspiración, mi motor y quienes me han apoyado incondicionalmente en cada paso que he dado a lo largo de cada.

A mi esposo, Michael Higueta Pineda, por su amor, paciencia, comprensión y constante aliento que me ha permitido concentrarme en mis estudios y alcanzar mis metas. Gracias por cuidarme cuando he estado enferma y por acompañarme en cada traspaso desde que estamos juntos.

Agradezco especialmente a mi tutor de tesis, el MSc. Daniel Fernando Ortiz González y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) por permitir mi vinculación en el macroproyecto “Desarrollo de nuevas recomendaciones tecnológicas para contribuir con la competitividad y la sostenibilidad del sector quinuero del departamento del Cauca” financiado por el Sistema General de Regalías registrado con el código BPIN 2018000100171. Además les agradezco por brindar su invaluable orientación, paciencia, dedicación e insumos necesarios para cada etapa de este proyecto de investigación. También le agradezco por proporcionarme los conocimientos relacionados con la agricultura que han sido de importancia para mi vida profesional y académica.

También quiero expresar mi gratitud a la PhD. Paola Caicedo, al PhD. Andrés Escorcía y a la Universidad Icesi por su confianza en mí y por brindarme la oportunidad de estudiar un posgrado mediante la concesión de una beca, puesto que, sin ese gran apoyo financiero hubiera sido imposible para alguien de mi condición económica continuar con mis estudios. Finalmente, pero no menos importante a mis mejores amigos: Camila Izquierdo López, Andrea Benítez y Jhan Carlos Salazar, por su constante apoyo, ánimo y amistad, aunque estuvieran lejos físicamente, siempre estuvieron cerca en espíritu y brindándome palabras de aliento en cada caída en este camino. Este logro no habría sido posible sin el respaldo y la contribución de las maravillosas personas mencionadas anteriormente y de mis compañeros de clase, a quienes les estaré eternamente agradecida.

CONTENIDO

FIRMAS DE AVAL DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO II.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	8
Palabras Clave:.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	11
Pregunta de investigación.....	11
Problemática central.....	11
Descripción de la problemática.....	11
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	12
Cultivo de la Quinoa.....	12
Suelos de orden Andisol.....	12
Fertilización del cultivo de quinua.....	13
Fertilizantes de síntesis química.....	13
Enmiendas orgánicas.....	15
Fertilizantes foliares.....	16
Fertilizantes biológicos o biofertilizantes.....	17
Granulometría del grano de quinua.....	21
OBJETIVOS.....	22
General.....	22
Específicos.....	22
METODOLOGÍA.....	22
1. Área de estudio.....	22
2. Diseño experimental.....	23
Modelo matemático.....	24
Insumos biológicos empleados.....	25
3. Establecimiento y manejo del experimento.....	28
4. Medición de variables de respuesta.....	29
5. Análisis estadístico.....	31
6. Ética y consentimiento.....	31

7. Escritura e ilustración de guía de bolsillo	32
RESULTADOS	32
Respuesta de las variables de crecimiento.....	32
Distribución de biomasa en los diferentes órganos	33
Distribución porcentual	34
Rendimiento de grano.....	35
Producción de grano por tamaño de grano	35
DISCUSIÓN.....	37
Respuesta del cultivo en el control (T1).....	37
Respuesta del cultivo la aplicación de MPCV (T4).....	38
Respuesta del cultivo la aplicación de MPCV (T4) y MPCV + fertilizante orgánico (T5).....	38
Respuesta del cultivo la aplicación de fertilizante químico (T2, T3, T6 y T7).....	39
APORTE DE LA INVESTIGACIÓN AL OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	41
Aporte de la investigación	41
Principales conclusiones de la investigación	41
Eficacia de los fertilizantes biológicos	41
Sostenibilidad agrícola	41
Transferencia de conocimiento.....	41
Apreciación científica de la investigación.....	42
Aspectos positivos	42
Aspectos negativos	42
CONCLUSIÓN	42
RECOMENDACIONES	43
1. Fertilización integrada como estrategia replicable	43
2. Desarrollo de estudios para ajustar dosis de materia orgánica	43
3. Investigación sobre el uso de microorganismos específicos	43
4. Transferencia de conocimiento agrícola.....	44
5. Adaptación de prácticas según análisis de suelo	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos de fertilización aplicados con sus respectivos ingredientes activos y dosis.....	25
Tabla 2. Resultado de análisis químico del suelo de la zona experimental.....	28
Tabla 3. Valores promedio \pm DE de las variables de crecimiento de plantas de quinua cv. Blanca de Jericó sometidas a los diferentes tratamientos.....	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de zona experimental, Silvia Cauca.....	23
Figura 2. Diseño experimental en campo.	24
Figura 3. Registro de altura de planta.....	29
Figura 4. Registro de peso seco de muestras vegetales colectadas en la zona experimental.....	29
Figura 5. Proceso de trillado de panojas de quinua.....	30
Figura 6. Proceso de tamizaje del grano colectado.....	30
Figura 7. Proceso de secado de cosecha.....	31
Figura 8. Guía de bolsillo de manejo agronómico de la quinua.....	32
Figura 9. Valores de la asignación porcentual de biomasa hacia los diferentes órganos vegetales: Panojas, tallos y raíz, bajo los diferentes tratamientos.....	34
Figura 10. Valores de la distribución porcentual del grano por tamaño.....	35
Figura 11. Producción por tamaño de grano ($t\cdot ha^{-1}$).	36
Figura 12. Índice de cosecha.....	37

RESUMEN

El cultivo de la quinua ha ganado importancia en los últimos años por sus bondades agronómicas y nutricionales, sin embargo existe el desafío de explorar alternativas sostenibles para la fertilización. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el rendimiento y granulometría de este cultivo en el municipio de Silvia Cauca bajo diferentes combinaciones de fertilizantes, biológico (3.7 L.ha⁻¹ de ACF-SR[®]), orgánico (1 t.ha⁻¹ de compost), químico edáfico (90-60-52 kg.ha⁻¹ de NPK) y químico foliar (1.5 L.ha⁻¹ de Agrimins completo[®]) que dieron lugar a siete tratamientos correspondientes a; T1: Testigo, T2: Fertilizante químico edáfico, T3: Fertilizante químico foliar, T4: Fertilizante biológico, T5: Fertilizante biológico + Fertilizante orgánico, T6: Fertilizante biológico + Fertilizante químico y, T7: Fertilizante Biológico + Fertilizante químico edáfico + Fertilizante orgánico. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar y el análisis de los datos se realizó a través de un ANOVA de una vía con un valor de significancia de 0.05. Los hallazgos de este estudio indicaron que la aplicación exclusiva de fertilizantes biológicos o de síntesis químicas mejoran la calidad y producción de la quinua y su elección de uso depende del enfoque de producción. Sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron cuando se implementó una fertilización integrada que incluyó la aplicación simultánea de los tres tipos de fertilizantes (T7) con el que se logró el mayor rendimiento de 4.17 t.ha⁻¹ y porcentaje de grano grande más alto con un 57% de la cosecha, los cuales fueron un 4.2 y 3.6 veces mayores en relación con el testigo.

Palabras Clave: MPCV (Microorganismos Promotores de Crecimiento Vegetal), granulometría, calidad, cosecha, biomasa.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el cultivo de la quinua se ha popularizado por sus propiedades nutricionales y gracias a su capacidad de crecer en condiciones ambientales extremas. Sin embargo, la agricultura actual propende por un enfoque que busca mejorar la productividad agrícola mientras se minimizan los impactos negativos en el medio ambiente (Mier-Tous *et al.*, 2023). En Colombia, el cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa*) ha incrementado el área en los últimos años debido a su relevancia en temas de seguridad y soberanía alimentaria, alto valor nutricional y adaptabilidad a condiciones ambientales extremas bajo el contexto del cambio climático (Cruz & Pinilla, 2021). Actualmente, la quinua se cultiva en varios departamentos del país, entre ellos Boyacá, Cundinamarca, Nariño y Cauca, siendo este último el de mayor área destinada a su siembra con alrededor de 1,400 hectáreas (Santos, 2020). A pesar del aumento de las áreas de cultivo, el departamento del Cauca se enfrenta al gran desafío técnico de cerrar la brecha productiva, que se refleja en el bajo rendimiento de 1.1 t.ha⁻¹ en comparación con 4.7 t.ha⁻¹ de Cundinamarca y el potencial productivo del cultivo de 6 t.ha⁻¹ (Chávez, 2017).

Una de las principales estrategias para incrementar el rendimiento del cultivo es a través de la fertilización (Gamboa *et al.*, 2020). Sin embargo, la limitada evolución tecnológica en esta área para el sistema productivo de la quinua en Colombia ha obligado a los agricultores a depender del conocimiento empírico o recomendaciones desarrolladas en otras latitudes (Chávez, 2017). Generalmente el cultivo se maneja con fertilizantes químicos o con materia orgánica, sin embargo, cuando hay un uso inadecuado de estos insumos se generan repercusiones productivas, económicas y ambientales, ya que la deficiencia de algún elemento esencial puede reducir el rendimiento y una aplicación excesiva ocasiona contaminación ambiental, toxicidad en las plantas y reducción en la rentabilidad (Kiyani *et al.*, 2022).

Gran parte de los fertilizantes químicos son importados, y los conflictos geopolíticos en países productores generan escasez y aumentan los precios, lo que amenaza la capacidad productiva y afecta la rentabilidad de los agricultores (Ben Hassen *et al.*, 2022). Esto ha llevado a que el país sea poco competitivo en el contexto mundial, por tanto, mientras se

desarrolla la industria de producción de fertilizantes, surge la necesidad de explorar prácticas agronómicas alternativas que permitan mejorar el sistema productivo (Franco *et al.*, 2020).

El uso de enmiendas orgánicas, fertilizantes biológicos y minerales (edáficos o foliares) son alternativas valiosas porque además de mejorar el rendimiento del cultivo, también permiten obtener cosechas de alta calidad (Gamboa *et al.*, 2020). Sin embargo, el uso combinado de estos insumos puede maximizar los beneficios, debido a que pueden existir sinergias que potencian su efecto en los cultivos (Salcedo *et al.*, 2022). Este fenómeno se puede dar porque cada uno de los insumos cumplen diferentes funciones en el suelo, por ejemplo, las enmiendas orgánicas mejoran las propiedades físicas, microbiológicas y químicas del suelo, mientras que los fertilizantes minerales aseguran que las plantas reciban los nutrientes esenciales de manera rápida y eficiente; y por su parte los inoculantes microbianos estimulan la producción de fitohormonas y mejoran la disponibilidad de nutrientes y agua para las plantas (Salcedo *et al.*, 2022).

En el mercado de la quinua, el tamaño del grano es uno de los parámetros de calidad más importante ya que influye en la presentación estética del producto y lo hace más atractivo para los consumidores. Además, tiene un mayor valorado en la industria alimentaria, dado a que garantiza procesos de transformación y características uniformes en los productos finales como harinas, cereales y expandidos principalmente (McDonnell *et al.*, 2023). Sin embargo, son pocos los estudios donde se ha evaluado el efecto de la aplicación de diferentes clases de fertilizantes sobre la granulometría y rendimiento en el cultivo de la quinua (Valdivia-Cea *et al.*, 2021).

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química en el tamaño y rendimiento de grano en el cultivo de la quinua en el municipio de Silvia Cauca y se realizó con el propósito de ofrecer alternativas para la nutrición del cultivo a través de tecnologías que impacten en la productividad y calidad del grano.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

- **Pregunta de investigación:** ¿El uso de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química mejora la productividad y calidad de los cultivos de quinua en Silvia, Cauca?
- **Problemática central:** Baja disponibilidad de alternativas que mejoren la producción y tamaño del grano de quinua en el departamento del Cauca.

Descripción de la problemática:

El desaprovechamiento del potencial productivo de la quinua en el departamento del Cauca ocurre porque en las zonas de clima frío donde se cultiva, poseen suelos derivados de cenizas volcánicas, los cuales son de carácter ácido y de baja fertilidad (Balaguera *et al.*, 2020). Además, los agricultores dependen del conocimiento empírico ya que gran parte de la investigación sobre el manejo agronómico del cultivo se ha realizado en otras latitudes con condiciones edafoclimáticas contrastantes a las de Colombia, lo que ha ocasionado bajos rendimientos y calidad de las cosechas (Chávez, 2017). Lamentablemente, estos avances no han sido adaptados y validados a través de investigación para que se ajusten a las condiciones y necesidades locales.

Se ha argumentado con frecuencia que la quinua es un cultivo rústico capaz de prosperar en suelos pobres; sin embargo, esta percepción ha llevado, en muchos casos, a que no se aplique fertilización al cultivo (Loayza-Aguilar *et al.*, 2020). En otras ocasiones, se confía exclusivamente en los nutrientes residuales del cultivo anterior (Ticona *et al.*, 2022). En el caso extremo, la falta de comprensión de los requerimientos nutricionales del cultivo puede derivar en la aplicación excesiva de fertilizantes, lo que provoca la contaminación de suelos y aguas (Du *et al.*, 2020). Estas situaciones comprometen la producción primaria y disminuyen la competitividad de la cadena tanto a nivel regional como global (Santos, 2020).

En este contexto, la fertilización integrada del cultivo que involucra la aplicación de insumos biológicos, orgánicos y minerales, emerge como una herramienta promisoría para mejorar la productividad agrícola de manera sostenible porque al usarlos de manera racional

contribuyen en la salud del suelo, aumentan la disponibilidad de nutrientes para las plantas, mejoran la resistencia a enfermedades y condiciones adversas del cultivo (Encines *et al.*, 2022). Sin embargo, en Colombia, la investigación con este enfoque ha sido limitada, por lo tanto, surge la necesidad de explorar y aplicar estas tecnologías en el cultivo de quinua para mejorar su competitividad y sostenibilidad a nivel nacional e internacional.

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Para abordar el problema planteado, se utilizarán fundamentos y enfoques relacionados con el manejo agronómico de cultivos y biotecnología agrícola que se describen a continuación. Entre ellos se incluyen la nutrición de plantas, fisiología vegetal y microbiología del suelo. Estas áreas del conocimiento proporcionan un marco conceptual para entender los procesos que afectan el crecimiento y desarrollo de la quinua en respuesta a la aplicación de insumos agrícolas para la nutrición de las plantas, así como las interacciones entre estas, el suelo y los microorganismos.

Cultivo de la Quinua:

La quinua (*Chenopodium quinoa*) perteneciente a la familia *Amaranthaceae*, es originaria de las regiones cercanas al lago Titicaca en América del Sur y se destaca globalmente por su excepcional perfil nutricional y su capacidad de adaptación o resiliencia a condiciones ambientales adversas, como, sequía, temperaturas extremas, suelos salinos o pobres en nutrientes (De la Cruz-Arango *et al.*, 2023). Esta especie es una planta dicotiledónea que se caracteriza por ser una herbácea anual y se distingue porque puede alcanzar un rendimiento cercano a las 6 t.ha⁻¹, dependiendo de la variedad, condiciones ambientales y manejo. Con respecto a su ecología, se conoce como una especie que crece bien en altitudes que van desde el nivel del mar hasta 4000 m.s.n.m, lo que la hace adecuada para diversas regiones geográficas (Walsh-Dilley, 2020).

Suelos de orden Andisol:

La quinua se cultiva en Colombia principalmente sobre la cordillera de los Andes, en suelos que se formaron a partir de materiales volcánicos, como cenizas y piroclastos, los cuales se

destacan por tener propiedades Ándicas y por contar con condiciones físicas favorables (Arifin *et al.*, 2022). Sus altos contenidos de materia orgánica proporcionan una alta aireación, capacidad de retención de agua y nutrientes y un ambiente propicio para los organismos del suelo (Rosero *et al.*, 2019). En términos químicos, los Andisoles suelen tener un pH ácido o muy ácido con valores que oscilan entre 4.5 y 5.5 lo que afecta la disponibilidad de macronutrientes. Además, este tipo de suelos cuenta con minerales alófonos que les confiere una alta capacidad de retención de fósforo el cual se inmoviliza. Estas características implican un gran desafío para buscar alternativas en la nutrición de diversos cultivos como la quinua (Solano *et al.*, 2021).

Fertilización del cultivo de quinua:

La fertilización es una práctica que involucra la aplicación de nutrientes a las plantas para suplir sus necesidades nutricionales y es una de las estrategias más efectivas para mejorar la fisiología y desempeño agronómico de cultivos. Particularmente se estimulan procesos biológicos vitales como la fotosíntesis, la cual favorece el crecimiento, desarrollo y producción (Peñañiel, 2020). Los elementos esenciales que requiere la quinua se clasifican en elementos mayores, secundarios y micronutrientes, dependiendo de la cantidad requerida para su crecimiento. Entre ellos están el carbono (C), oxígeno (O) que los toman del aire a través del CO₂ y el hidrógeno (H) por medio de la hidrólisis del agua (Johnson & Mirza, 2020). Por su parte, se ha reportado que el cultivo mejora el rendimiento especialmente con la aplicación de los macronutrientes, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) ya que son los que las plantas necesitan en mayores cantidades (Johnson & Mirza, 2020). Entre los elementos secundarios se encuentran el calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Y los micronutrientes se necesitan en cantidades mucho menores, como el hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl) (Johnson & Mirza, 2020).

Fertilizantes de síntesis química:

Existen diferentes tipos de fertilizantes dependiendo de la fuente de nutrientes. Uno de los más usados en la agricultura son los fertilizantes de síntesis química. Este tipo de fertilizantes son elaborados mediante procesos industriales a partir de transformación de materias primas inorgánicas con ayuda de fuentes de energía fósil como gas o derivados del petróleo

(González, 2018). El uso de fertilizantes de síntesis química presenta múltiples ventajas para el manejo agronómico de cultivos. Los nutrientes en forma química vienen en altas concentraciones y son fácilmente solubles en agua, lo que permite su rápida disponibilidad para las plantas lo cual promueve un crecimiento acelerado y una respuesta inmediata a la fertilización (Caro, 2024). Otro de sus atributos es que se pueden dosificar los elementos de manera precisa de acuerdo con las necesidades específicas del cultivo y etapa de crecimiento (Rudistein, 2023).

Sin embargo, estos fertilizantes tienen desventajas significativas que deben considerarse. En primer lugar, el impacto ambiental es notable, puesto que, su uso excesivo puede contribuir con la contaminación del agua por la lixiviación de nitratos y de la atmósfera por la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que son causantes del cambio climático (Srivastav, 2020, Caro, 2024). Además, el proceso industrial para su fabricación demanda una cantidad considerable de energía, principalmente proveniente de combustibles fósiles, lo que incrementa las emisiones GEI y además existe el riesgo de reducción de la actividad microbiológica del suelo si se usan en exceso, comprometiendo su salud a largo plazo (Pahalvi *et al.*, 2021). En términos económicos, los fertilizantes químicos suelen ser más costosos que los orgánicos debido a los procesos industriales y las materias primas involucradas, lo cual puede reducir la rentabilidad de cultivos si no se emplean adecuadamente (Abebe *et al.*, 2022).

Los resultados de Al-Naggar *et al.* (2022) revelaron que, la tasa de nitrógeno tiene efectos positivos sobre la mayoría de los rasgos agronómicos de la quinua como altura, desarrollo radicular y eficiencia productiva. En este estudio, el rendimiento con una dosis de 71.4 de $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ N fue de 801 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ mientras que con una dosis de 214.2 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ N fue de 1321 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, lo que representó un incremento del 64,9% en el rendimiento. Similarmente en el experimento llevado a cabo por Zamani, *et al.* (2023) donde evaluaron tres dosis de fertilizantes nitrogenados: 0, 100 y 200 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, encontraron que el mayor rendimiento equivalente a 3326 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ se logró con la aplicación de 200 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Por su parte, Wang et al. (2021) determinaron los efectos de las prácticas de fertilización sobre el crecimiento, el rendimiento y la calidad de la semilla de quinua. Las dosis empleadas fueron 80, 160 y 240 kg.ha⁻¹ de N. Los resultados arrojaron que la dosis de 160 kg.ha⁻¹ generó una producción de 32.8 g.planta⁻¹ que fue significativamente superior al rendimiento obtenido con 80 kg.ha⁻¹ de N con el que se obtuvo 28.4 g.planta⁻¹, lo cual representó un incremento del 15.5%. Otros estudios han demostrado que el uso de fertilizante con fuente de NPK puede mejorar el rendimiento en la quinua incluso por encima de las 7 t.ha⁻¹ (Chávez, 2017).

Enmiendas orgánicas:

Las enmiendas o abonos orgánicos son otra fuente de nutrientes que se elaboran a partir de materiales orgánicos como estiércol de animales, residuos de plantas, harina de huesos, entre otros. Son beneficiosos porque mejoran las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Desde una perspectiva física, la materia orgánica mejora la aireación del suelo lo que facilita la penetración de las raíces de las plantas (Soria, 2023). En cuanto a la química de suelos, actúa como un amortiguador de pH, ayudando a mantener un entorno adecuado para el crecimiento vegetal y es una opción para enriquecer el suelo de nutrientes de manera gradual (Riascos *et al.*, 2022). También mejora la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) para adsorber y liberar nutrientes, mientras que microbiológicamente promueven la diversidad y abundancia de microbios beneficiosos en el suelo, como bacterias y hongos, que descomponen la materia orgánica y liberan nutrientes, con lo que se mejora las condiciones donde crecen las raíces (Hernández, 2023).

En conjunto, estos efectos mejoran la fertilidad del suelo, aumentan la productividad de los cultivos y contribuyen a la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas (Riascos *et al.*, 2022). Sin embargo, una de las desventajas del uso de las enmiendas orgánicas es que su fabricación y uso, demanda una gran cantidad de mano de obra con lo cual se incrementan los costos de producción. Además, para observar efectos en el cultivo se requiere de grandes volúmenes ya que el aporte de nutrientes es significativamente bajo en comparación con un fertilizante químico (Sánchez *et al.*, 2016). Por otro lado, un factor crítico en el uso de enmiendas orgánicas es la tasa de mineralización, que determina la velocidad de liberación

de nutrientes absorbibles por las plantas (Reyna *et al.*, 2021). Este proceso depende de factores como la composición de la materia orgánica, las condiciones del suelo y la actividad microbiana. Una mineralización equilibrada asegura una liberación adecuada de nutrientes, mientras que tasas desbalanceadas pueden limitar su disponibilidad o causar pérdidas (Reyna *et al.*, 2021).

Mouttaqi *et al.* (2023) evaluaron los efectos de las enmiendas orgánicas en diferentes condiciones de salinidad de suelos. En condiciones de baja salinidad de 4 dS.m⁻¹, el estiércol de gallina registró los valores de rendimiento más altos cercanos a 2 t.ha⁻¹, mientras que el control registró una productividad de 1.43 t.ha⁻¹, lo cual representó un incremento del 42.6% (Mouttaqi *et al.*, 2023). Estos hallazgos indicaron que las enmiendas orgánicas son una estrategia viable para el incremento de la producción incluso en zonas altamente salinas (Mouttaqi *et al.*, 2023).

Por su parte, El-Gamal *et al.* (2020) estudiaron los efectos de cuatro fertilizantes orgánicos en el cultivo de quinua sembrada bajo diferentes tipos de suelos. Las combinaciones de compost se aplicaron con la mitad de la dosis recomendada de NPK mineral correspondiente a 214, 120 y 120 kg.ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente. Los resultados mostraron que la mezcla de paja de soja con gallinaza y NPK resultó en los parámetros de crecimiento y rendimiento más altos de quinua en todos los suelos evaluados. El rendimiento osciló entre 1.16 y 3.48 t.ha⁻¹ en los diferentes tipos de suelos (El-Gammal *et al.*, 2020).

Fertilizantes foliares:

Los fertilizantes foliares son productos de síntesis química utilizados en la agricultura para suministrar nutrientes de rápida asimilación que se aplican directamente a las hojas de las plantas. Estos fertilizantes pueden contener una variedad de nutrientes los cuales son absorbidos a través de un proceso complejo que depende de la estructura de la hoja y de las propiedades químicas de los nutrientes aplicados (Hong *et al.*, 2021, Niu *et al.*, 2021).

A pesar de que las hojas tienen una cutícula cerosa que las protege contra la pérdida de agua, también puede limitar el proceso de absorción de nutrientes. Básicamente, estos fertilizantes

son absorbidos a través de los poros y estomas y luego son transportados a través del sistema vascular de la planta para ser usados en su crecimiento, desarrollo y producción de biomasa (Hong *et al.*, 2021). Una de las principales ventajas del uso de este tipo de fertilizantes es que ayuda a la corrección de deficiencias de micronutrientes, como el hierro, zinc, manganeso y cobre, porque estos son requeridos en pequeñas cantidades y su aplicación foliar puede proporcionar una corrección rápida y precisa (Niu *et al.*, 2021).

En otros cultivos como el maíz, arroz y soja, los fertilizantes foliares han mostrado sus aportes en la mejora de la eficiencia de la fertilización y productividad agrícola (Niu *et al.*, 2021). Similarmente en la quinua, se ha demostrado su potencial para mejorar el rendimiento y la calidad de las cosechas, así como para incrementar la absorción de nutrientes y la resistencia a factores de estrés abiótico (Kiyani *et al.*, 2022).

En el estudio realizado por Pattar *et al.* (2022) se evaluó la influencia de la pulverización foliar en el crecimiento, rendimiento y calidad de las semillas de quinua. Los resultados revelaron que la pulverización foliar de ácido ascórbico en una concentración de 50 mg.L⁻¹ a los 45 días registró los valores más altos en el crecimiento, rendimiento y atributos de calidad del cultivo al registrar una altura de 127 cm, número total de panículas por planta de 9.67, panículas productivas por planta de 7.33, producción de semillas por planta de 153.33 g, rendimiento de semillas de 1687 kg.ha⁻¹, peso de 1000 semillas de 3.33 g y contenido de proteína de 14 g.

Fertilizantes biológicos o biofertilizantes:

En los últimos años a nivel mundial, la actividad de diferentes especies de microorganismos se ha considerado una estrategia para fortalecer los procesos de biofertilización y se han planteado como una solución innovadora para mejorar la productividad y competitividad de manera sostenible en muchos cultivos (Ledezma & Coronado, 2023). Estos organismos son comúnmente llamados Microorganismos Promotores del Crecimiento Vegetal (MPCV), los cuales pueden clasificarse en diferentes grupos funcionales según sus mecanismos de acción, entre estos se encuentran los fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo, hongos formadores de micorrizas, degradadores de materia orgánica y productores de fitohormonas

(Hidalgo, 2023). En la rizosfera, los MPCV interactúan directamente con las raíces de las plantas, haciendo más eficiente la absorción de agua y nutrientes en el suelo (Venica, 2021).

En la litosfera, los MPCV pueden colonizar la superficie de las hojas, protegiendo a las plantas contra patógenos foliares, haciendo más eficaz la absorción de nitrógeno atmosférico y mejorando la resistencia al estrés abiótico (Rosero & Giraldo, 2023). En el caso específico de la quinua, se han realizado diversos estudios sobre el uso de MPCV en los que se han identificado cepas bacterianas y hongos promotores de crecimiento y organismos que le confieren a las plantas mayor resistencia a condiciones ambientales adversas (Galecio *et al.*, 2023).

En la presente investigación se utilizaron diversos microorganismos que forman parte de los fertilizantes suministrados por Blue Planet Labs®, una empresa dedicada a la innovación tecnológica en microbiología aplicada al restablecimiento ambiental de sistemas productivos agrícolas (Blue Planet, 2024). Sus productos están compuestos por consorcios de MPCV no modificados genéticamente (nOGM), desarrollados en Estados Unidos. Las bacterias empleadas cuentan con un nivel de bioseguridad BSL-1, según la referencia de la American Type Culture Collection (ATCC), lo que garantiza que no representan riesgos para la salud humana, animal o vegetal. Las formulaciones de Blue Planet® ofrecen una alternativa biológica altamente sostenible, con una notable eficiencia en la mejora de los sistemas productivos y una rápida obtención de resultados.

Uno de los insumos utilizados fue ACF SR, el cual contiene una cepa fotosintética que mejora la eficiencia y efectividad de la fijación de CO₂ en el proceso de fotosíntesis. Estos microorganismos no solo producen oxígeno, sino que funcionan en un espectro lumínico más amplio gracias a su bacterioclorofila, un tipo especial de clorofila que aprovecha una gama mayor de luz solar para generar energía (Blue Planet, 2018). Su gran versatilidad metabólica les permite operar tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, produciendo gas hidrógeno a partir de compuestos de carbono o nitrógeno, o transformando sulfuro de hidrógeno en azufre elemental. Además, pueden degradar compuestos orgánicos complejos,

liberando energía y produciendo nutrientes fácilmente absorbibles por las plantas (Blue Planet, 2018).

El segundo fertilizante biológico utilizado fue ACF SR PLUS, una innovadora tecnología que combina ácidos húmicos y fúlvicos derivados de leonardita con una diversidad de microorganismos benéficos. Su acción se basa en la aplicación de ácidos húmicos, los cuales mejoran la estructura del suelo, incrementando su porosidad y aireación, al mismo tiempo que favorecen la retención de agua mediante la mineralización de la materia orgánica (Blue Planet, 2018). Además, estos ácidos incrementan la capacidad de intercambio catiónico del suelo, neutralizan y ligan compuestos tóxicos, y protegen contra la lixiviación y el daño por quemado asociado con el uso de fertilizantes sintéticos (Blue Planet, 2018).

Los productos mencionados con anterioridad, se emplearon con la finalidad de potenciar productivamente el cultivo con fertilizantes biológicos constituidos por microorganismos activos Heterotróficos Solubilizadores de fósforo (P_2O_5): *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*; bacterias Anaeróbicas-facultativas solubilizadoras de fósforo (P_2O_5): *Bacillus licheniformis*; bacterias fotosintéticas Fijadores de Nitrógeno - Carbono (CO_2): *Rhodopseudomonas palustris*, bacterias Quimiosintéticas Oxidación biológica de amonio a nitritos y de nitritos a nitratos: *Nitrosomonas europea*, oxidación biológica de amonio a nitrito: *Nitrobacter winogradskyi*.

El uso de bacterias fijadoras de nitrógeno en el cultivo de quinua ha sido objeto de investigación en varios estudios (García, 2022). En la investigación de León-Fajardo (2019), se evaluó la interacción simple y combinada de bacterias endófitas, para desarrollar nuevas formulaciones de bioinoculantes y generar alternativas para mejorar las variables agronómicas del cultivo de quinua. Se identificó que el tratamiento más sobresaliente fue en el que se usó *Bacillus pumilus*, porque se registraron una altura de planta de 104.14 cm, frente a 98.07 cm que fue la más baja, altura de panoja de 34.32cm respecto a 28.05 cm a la más pequeña y rendimiento de grano en 8 g por panoja (León-Fajardo *et al.*, 2019). La interacción *B. pumilus* y *P. polymyxa* y la combinación de *B. pumilus*, *B. subtilis* y *P. polymyxa* fueron las cepas nativas que promovieron un crecimiento significativamente superior en las plantas

de quinua respecto al producto comercial TRICOBAL, como control positivo (León-Fajardo *et al.*, 2019).

Por otra parte, Pasha *et al.* (2023), estudió la combinación de inoculantes microbianos con el objetivo optimizar el rendimiento de quinua. Se evaluaron cinco cepas microbianas: *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium*, *Fraturia aurantia*, *Pseudomonas fluorescens* y *Glomus fasciculatum* en diferentes combinaciones. El mayor rendimiento se obtuvo con el consorcio constituido por *Azotobacter chroococcum* + *Bacillus megaterium* + *Pseudomonas fluorescens* con 2350 kg.ha⁻¹, mientras que el rendimiento más bajo fue de 1683 kg.ha⁻¹ correspondiente al control, lo cual representó un incremento del 28.4% (Pashsa *et al.*, 2023).

Los microorganismos solubilizadores de fósforo son un grupo de bacterias y hongos que tienen la capacidad mejorar la disponibilidad del fósforo al convertirlo en formas que las plantas pueden absorber y utilizar fácilmente (Velasco, 2021). Los géneros más comunes de microorganismos solubilizadores de fósforo son: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, *Serratia* y *Klebsiella* (Bacterias); *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma* y *Mucor* (Hongos) y *Streptomyces* (Actinomicetos) (Pérez, 2021).

La investigación de León-Ttacca. (2022) donde usaron hongos endófitos para evaluar el efecto de diferentes cepas de *Trichoderma sp.* sobre el crecimiento aéreo, radical y rendimiento de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). Los resultados arrojaron que el testigo ocupó siempre el último lugar, indicando la importancia de la inoculación de la semilla con *Trichoderma sp.* que produjo incrementos en el crecimiento vegetativo y rendimiento de la quinua, en donde TE-7 y TE-126 se identificaron como las mejores cepas (León-Ttacca *et al.*, 2022).

Las micorrizas se establecen como relaciones simbióticas entre las raíces de las plantas y los hongos. En esta relación, el hongo proporciona a la planta nutrientes esenciales, a través de su red de hifas que extienden el área de absorción de la raíz (Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022). Este tipo de asociación es beneficioso también para el hongo porque obtiene de la planta

compuestos orgánicos necesarios para su crecimiento. Las micorrizas pueden aumentar la resistencia de las plantas a enfermedades, mejorar la estructura del suelo y promover el crecimiento saludable de las plantas (Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022).

Toubali *et al.* (2022) emplearon biofertilizantes basados en hongos micorrízicos arbusculares (AMF) y compost como estrategia para minimizar las pérdidas y mantener la productividad de los cultivos en áreas áridas y semiáridas. Se evaluó el rendimiento del consorcio de AMF (Mc-consorcio micorrízico) en combinación con dos compostajes: residuos verdes al 5% (GW5) y al 10% (GW10) y estiércol de caballo HM5 y HM10 en comparación con la cepa pura (Ms) aplicada por separado y/o en combinación con los mismos biofertilizantes (Toubali *et al.* 2022). La aplicación de McHM10 (consorcio micorrízico + estiércol de caballo al 10%) aumentó la conductancia estomática y el rendimiento de semillas en un 20% y 277%, respectivamente, en comparación con el control bajo estrés hídrico (Toubali *et al.* 2022).

Por su parte, Wissal Benaffari *et al.* (2022) investigaron el impacto de dos dosis de vermicompost (5 y 10 t.ha⁻¹) y hongos micorrízicos arbusculares aplicados individualmente, o en aplicación conjunta, en la atenuación de los impactos negativos de la escasez de agua y la mejora de las características agrofisiológicas de la quinua. El uso de hongos micorrízicos promovió el crecimiento de las plantas activando la maquinaria de fotosíntesis y asimilación de nutrientes, lo que llevó a un aumento del 26% en el rendimiento de semillas de quinua en relación con el control (Benaffari *et al.*, 2022). Después del experimento, el contenido de materia orgánica total, fósforo, nitrógeno, calcio y glomalina del suelo mejoró con la aplicación única o combinada de hongos con capacidad micorrízica (Benaffari *et al.*, 2022).

Granulometría del grano de quinua:

Además del rendimiento, el tamaño de grano es una de las variables más importantes de la calidad física de la cosecha del cultivo. La granulometría es una metodología útil que se usa comúnmente para estudiar la distribución de tamaño de las semillas de una cosecha. Aunque no existen normas específicas para clasificar por tamaño el grano de quinua en Colombia, existe la Norma Técnica Peruana y Boliviana (NTP 205.062:2021 y NB NB 324002, 2006) las cuales establecen que el grano se considera grande cuando tiene un diámetro superior a

1.7 mm; mediano entre 1.4 mm y 1.7 mm y pequeño, tamaño inferior a 1.4 mm. Estas mediciones ayudan a los productores y compradores a clasificar y comercializar la quinua según estándares internacionales de calidad, garantizando que cumpla con los requisitos de los consumidores y mercados específicos (Basantes, 2023). La mejora del tamaño y la uniformidad del grano es un objetivo importante para los productores de quinua ya que puede ayudar con la competitividad y valor en el mercado (Basantes, 2023).

OBJETIVOS

General: Evaluar el efecto de la aplicación de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química en el tamaño y rendimiento de grano en el cultivo de la quinua en el municipio de Silvia, Cauca.

Específicos:

1. Estudiar el efecto de la aplicación de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química en el tamaño de grano de la quinua.
2. Determinar el rendimiento del cultivo de la quinua en respuesta a la aplicación de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química
3. Elaborar material intelectual de divulgación para transferir los resultados obtenidos a los cultivadores de quinua. *Guía de bolsillo de manejo agronómico.*

METODOLOGÍA

1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la vereda San Fernando, municipio de Silvia, departamento del Cauca, Colombia (latitud 2°37'46''N, longitud, 76°20'37''O) (Fig. 1). La zona experimental se encuentra a una altitud de 2.697 m.s.n.m, con una temperatura promedio anual de 18°C, humedad relativa del 83% y precipitación promedio anual de 1869mm (WeatherSpark, 2024).



Figura 1. Ubicación geográfica de zona experimental, Silvia Cauca. Mapa tomado de: Historial de archivo de Wikipedia.

2. Diseño experimental

Debido a que la pendiente del terreno fue una fuente de variación en la investigación, se empleó un diseño experimental de bloques completamente al azar (DBCA) para disminuir el error experimental. Se evaluaron algunas combinaciones de fertilizantes: Biológico ($3.7 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$ de AquaClean ACF-SR), orgánico ($1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de compost), químico edáfico ($90-60-52 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de NPK) y químico foliar ($1.5 \text{ L} \cdot \text{ha}^{-1}$ de Agrimins completo) que dieron lugar a siete tratamientos correspondientes a; T1: Testigo, T2: Fertilizante químico edáfico, T3: Fertilizante químico foliar, T4: Fertilizante biológico, T5: Fertilizante biológico + Fertilizante orgánico, T6: Fertilizante biológico + Fertilizante químico y, T7: Fertilizante Biológico + Fertilizante químico edáfico + Fertilizante orgánico (Tabla 1). Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones para un total de 28 unidades experimentales (UE) y cada una de ellas correspondió a una parcela de 2.7 m de ancho por 3.2 m de largo para un área de 8.64 m^2 en las cuales se sembraron 4 surcos de 3.2 m longitud, a unas distancias de siembra de 0.9 m entre surcos y 0.4 m entre plantas, equivalente a 27.778 sitios de siembra por hectárea y en cada sitio se sembraron dos plantas para una densidad de siembra de $5.5 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$ o $55.556 \text{ plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Fig. 2).

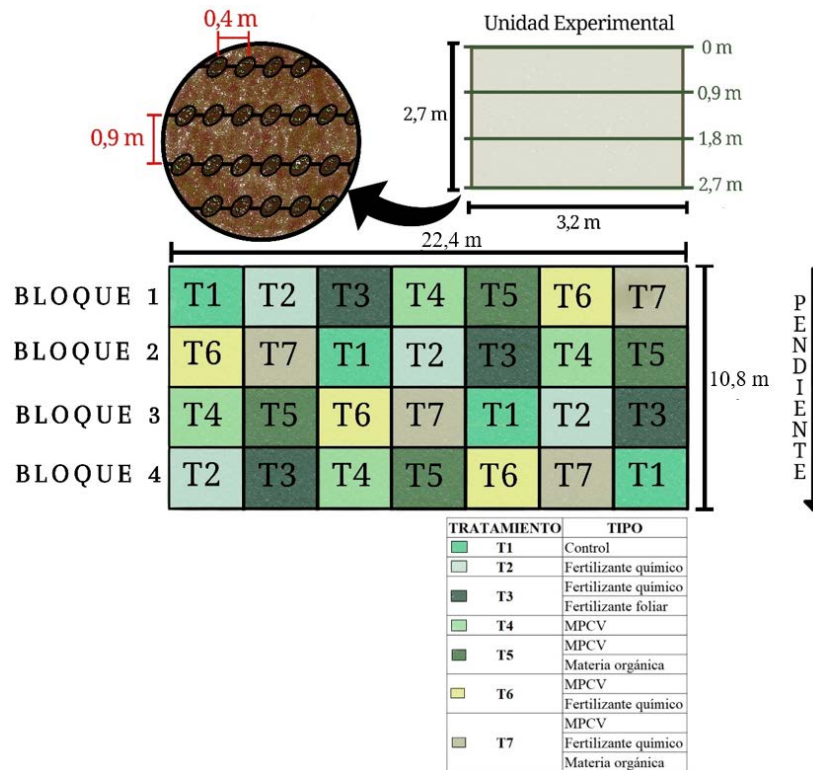


Figura 2. Diseño experimental en campo. Fuente: Elaboración propia.

Modelo matemático

El modelo matemático implementado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + \tau_j + \varepsilon_{ij} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = respuestas del j-ésimo tratamiento para el i-ésimo bloque.

μ = media poblacional de la variable de respuesta.

β_i = efecto del bloque i en la respuesta.

τ_j = efecto del tratamiento j en la respuesta.

$i=1,2,\dots,b$ $j=1,2,\dots,a$

b= número de bloques.

a= número de tratamientos.

Insumos biológicos empleados

- **ACF –SR:** contiene cepas naturales de *bacillus* heterotróficos, aerobios, anaerobios-facultativos y bacterias fotosintéticas y quimiosintéticas nitrificantes en solución acuosa, de acción directa en la estructura nutricional de la planta (Blue Planet, 2018) (Tabla 1).
- **ACF-SR-PLUS :** cuenta con ácidos húmicos y fúlvicos de leonardita, más cepas naturales de *bacillus* heterotróficos, aerobios, anaerobios-facultativos, bacterias fotosintéticas, en una solución acuosa, para mejorar las características físicas y las condiciones bioquímicas del suelo (Blue Planet, 2018) (Tabla 1).
- **Agrimins Completo:** es un fertilizante foliar balanceado que aporta macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, así como micronutrientes esenciales como magnesio, azufre, zinc, boro y cobre (Agroactivo, 2017). Además, contiene ácido naftalenacético (ANA), una fitohormona que mejora el desarrollo de tejidos fortaleciendo estructuras como el pedúnculo de flores y frutos, y previene la caída prematura, lo que incrementa la calidad y el rendimiento de las cosechas (Agroactivo, 2017). Es especialmente útil en suelos ácidos o deficientes en nutrientes y se recomienda aplicarlo en momentos críticos del crecimiento o producción del cultivo para maximizar los rendimientos (Agroactivo, 2017) (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamientos de fertilización aplicados con sus respectivos ingredientes activos y dosis. Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento	Tipo	Producto	Ingrediente	Dosis por hectárea
T1	Control	N/A	N/A	N/A

T2	Fertilizante químico edáfico	Urea, DAP y KCl	Nitrógeno total (N), Fósforo asimilable (P ₂ O ₅) y Potasio asimilable (K ₂ O)	90, 60, 52 kg.ha ⁻¹ de NPK
T3	Fertilizante químico edáfico	Urea, DAP y KCl	Nitrógeno total (N), Fósforo asimilable (P ₂ O ₅) y Potasio asimilable (K ₂ O)	90, 60, 52 kg.ha ⁻¹ de NPK
	Fertilizante químico foliar	Agrimins Completo	* Nitrógeno total (N), Fósforo asimilable (P ₂ O ₅) y Potasio asimilable (K ₂ O). * Nitrógeno Total (N) 200 g.L ⁻¹ , Nitrógeno Amoniacal (N) g.L ⁻¹ , 40 Nitrógeno Ureico (N) 160 g.L ⁻¹ , Fósforo Asimilable (P ₂ O ₅) 100 g.L ⁻¹ , Potasio Soluble en Agua (K ₂ O) 50 g.L ⁻¹ , Magnesio (MgO) 10 g.L ⁻¹ , Azufre Total (S) 14 g.L ⁻¹ , Boro (B) 1.5 g.L ⁻¹ , Cobre (Cu) 2.5 g.L ⁻¹ , Hierro (Fe): 1.0 g.L ⁻¹ , Manganeso (Mn) 1.0 g.L ⁻¹ , Molibdeno (Mo) 0.03 g.L ⁻¹ , Zinc (Zn) 5.0 g.L ⁻¹ , Fitohormona (ANA).	1,5 L.ha ⁻¹ + 0,5 L.ha ⁻¹
T4	Fertilizante biológico	ACF SR + ACF PLUS	<i>B. amyloliquefaciens</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>Rhodopseudomonas</i>	3,7 L.ha ⁻¹ foliar + 3,7

			<i>palustris, Nitrosomonas europea, Nitrobacter winogradskyi</i>	L.ha ⁻¹ edáfica
T5	Fertilizante biológico	ACF SR + ACF PLUS	<i>B. amyloliquefaciens, B. subtilis, B. licheniformis, Rhodopseudomonas palustris, Nitrosomonas europea, Nitrobacter winogradskyi</i>	3,7 L.ha ⁻¹ foliar + 3,7 L.ha ⁻¹ edáfica
	Fertilizante orgánico	Compostaza Perkins	Nitrógeno total (N): 2.0%, Fósforo total (P ₂ O ₅): 1.5%, Potasio soluble en agua (K ₂ O): 1.5%, Calcio (Ca): 2.0%, Magnesio (Mg): 1.5%	1 t.ha ⁻¹
T6	Fertilizante biológico	ACF SR + ACF PLUS	<i>B. amyloliquefaciens, B. subtilis, B. licheniformis, Rhodopseudomonas palustris, Nitrosomonas europea, Nitrobacter winogradskyi</i>	3,7 L.ha ⁻¹ foliar + 3,7 L.ha ⁻¹ edáfica
	Fertilizante químico edáfico	Urea, DAP y KCl	Nitrógeno total (N), Fósforo asimilable (P ₂ O ₅) y Potasio asimilable (K ₂ O)	90, 60, 52 kg.ha ⁻¹ de NPK
T7	Fertilizante biológico	ACF SR + ACF PLUS	<i>B. amyloliquefaciens, B. subtilis, B. licheniformis, Rhodopseudomonas palustris, Nitrosomonas europea, Nitrobacter winogradskyi</i>	3,7 L.ha ⁻¹ foliar + 3,7 L.ha ⁻¹ edáfica

	Fertilizante químico edáfico	Urea, DAP y KCl	Nitrógeno total (N), Fósforo asimilable (P ₂ O ₅) y Potasio asimilable (K ₂ O)	90, 60, 52 kg.ha ⁻¹ de NPK
	Fertilizante orgánico	Compostaza Perkins	Nitrógeno total (N): 2.0%, Fósforo total (P ₂ O ₅): 1.5%, Potasio soluble en agua (K ₂ O): 1.5%, Calcio (Ca): 2.0%, Magnesio (Mg): 1.5%	1 t.ha ⁻¹

3. Establecimiento y manejo del experimento

Se sembraron semillas de quinua (*Chenopodium quinua*) variedad Blanca de Jericó a una profundidad de 2 cm en chorrillo. Debido a la alta densidad de siembra fue necesario hacer raleo una vez emergieron para garantizar la distancia entre plantas y la cantidad por sitio. El manejo del cultivo se realizó de acuerdo con las prácticas agronómicas que recomienda la guía de cultivo de la quinua proporcionado por la FAO (Ramos, 2022). Además, se tuvo en cuenta los resultados del análisis químico de suelos consignado en la tabla 2, para ajustar las dosis de fertilizantes usados. La interpretación se realizó con base en los niveles críticos publicados por Rojas *et al.* (1992).

Tabla 2. Resultado de análisis químico del suelo de la zona experimental. Fuente: Elaboración propia.

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	RESULTADO	INTERPRETACIÓN
pH (1:2,5)	5.29	Fuertemente ácido
Aluminio (Al) Intercambiable (cmol(+).kg ⁻¹) 1)	0.84	Sin restricción
Materia Orgánica (MO) (g.100g ⁻¹)	12.19	Alto
Fosforo (P) (Bray II) (mg.kg ⁻¹)	13.59	Bajo
Potasio (K) (cmol(+).kg ⁻¹)	0.12	Bajo

Calcio (Ca) (cmol(+).kg ⁻¹)	3.28	Medio
Magnesio (Mg) (cmol(+).kg ⁻¹)	0.74	Bajo
Azufre (S) (mg.kg ⁻¹)	8.14	Medio
Capacidad Intercambio Catiónico Efectivo (CICE) (cmol(+).kg ⁻¹)	9.88	Media

4. Medición de variables de respuesta

Se eligieron cuatro plantas representativas de los surcos centrales de cada unidad experimental, a las que se les evaluó la altura, materia seca de cada órgano, rendimiento y calidad de grano en términos de tamaño. Altura de la planta (cm): se registró la longitud a ras del suelo hasta el ápice de la panoja principal, (Fig. 3).



Figura 3. Registro de altura de planta. Fotografía tomada por: Daniel Fernando Ortiz.

Materia seca de la planta (g): En Agrosavia Sede Popayán se diseccionaron la raíz, tallos y panojas de cada planta, posteriormente se secaron en horno a 65°C hasta alcanzar peso constante y finalmente cada muestra se pesó en una balanza analítica (Fig. 4).



Figura 4. Registro de peso seco de muestras vegetales colectadas en la zona experimental.

Fotografía tomada por: Daniel Fernando Ortiz.

Peso de grano (g): una vez las panojas fueron deshidratadas bajo cubierta de plástico en la zona experimental en Silvia Cauca, se realizó el proceso de trillado con el fin de extraer el grano (Fig. 5).



Figura 5. Proceso de trillado de panojas de quinua. Fotografía tomada por: Daniel Fernando Ortiz.

Estudio granulométrico (g o %): cada muestra se dispuso en un tamizador mecánico que separó las semillas en tres diferentes diámetros: 1.7 mm, 1.4 mm y 1.0 mm. Cada muestra fue vertida en una bolsa hermética para el pesaje en una balanza analítica y posteriormente se registraron los valores en el respectivo formato de evaluación (Fig. 6).



Figura 6. Proceso de tamizaje del grano colectado. Fotografía tomada por: Daniel Fernando Ortiz.

Rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$): se realizó la cosecha de las panojas de cada unidad experimental, las cuales se secaron bajo una estructura con cubierta plástica y se procedió con el proceso de trillado para la obtención de grano (Fig. 7). Una vez se obtuvo se empacó en bolsas plásticas de cierre hermético se registró del peso en una balanza analítica y con los datos se efectuó el cálculo del rendimiento.



Figura 7. Proceso de secado de cosecha. Fotografía tomada por: Natalia Duque.

5. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía utilizando el software Statgraphics Centurion XVIII. La comparación de medias se determinaron mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05.

6. Ética y consentimiento

El estudio se realizó siguiendo las normas éticas establecidas por la institución universitaria y AGROSAVIA según las directrices nacionales e internacionales para la investigación agrícola, donde se efectuaron acuerdos formales con los productores de la zona. Se realizó la correspondiente divulgación del anteproyecto a las personas que residen en la zona experimental con la finalidad de la aceptación por parte de los campesinos de la zona.

7. Escritura e ilustración de guía de bolsillo.

Se realizó la respectiva revisión de fuentes bibliográficas para la realización de la Guía de manejo agronómico de la quinua publicada por la FAO, donde se identificaron los puntos clave de cada etapa del cultivo: preparación del suelo, siembra, riego, manejo de plagas y cosecha (Fig. 8). Posteriormente, se realizó la simplificación y adaptación del contenido para así hacerlo práctico y comprensible para los agricultores, además de incorporar los resultados de la investigación.

Seguidamente se ejecutó el diseño del formato de bolsillo de tal manera que fuera compacto y visual, con ilustraciones propias. Finalmente, se desarrolló la validación del contenido a través de agricultores y profesionales del área revisaron el borrador para garantizar su aplicabilidad y se realizaron los ajustes basados en los comentarios.



Figura 8. Guía de bolsillo de manejo agronómico de la quinua. Elaborado por: Natalia Duque Hoyos.

RESULTADOS

Respuesta de las variables de crecimiento

La altura de las plantas presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) (Tabla 3). Las plantas que exhibieron el porte significativamente más bajo correspondieron a T1 con un valor promedio de 90 cm, a diferencia de los demás tratamientos que presentaron alturas promedios

entre 105 y 111 cm. El peso seco de tallos significativamente más alto lo exhibieron T1 y T2 con valores de 41 y 46 g respectivamente, en tanto los demás tratamientos presentaron valores promedios entre 27 y 37 g. El peso seco de panojas fue significativamente más alto en T3, T6 y T7 con valores de 78, 72 y 77 g respectivamente y los demás tratamientos tuvieron valores promedio que oscilaron entre 42 y 57 g. La mayor acumulación de biomasa de toda la planta se halló en T6 con 129 g, la cual fue diferente significativamente a los demás tratamientos cuyos valores oscilaron entre 87 y 119 g. En contraste, la longitud y peso seco de raíz fueron las únicas variables que no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos.

Tabla 3. Valores promedio \pm DE de las variables de crecimiento de plantas de quinua cv. Blanca de Jericó sometidas a los diferentes tratamientos. ($p < 0.05$) las letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas. Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento	Altura (cm)	Long.	PS			
		Raíz (cm)	PS Raíz (g)	PS Tallos (g)	Panojas (g)	PS Total
T1	90 \pm 3.3b	36 \pm 8.3a	14 \pm 3.9a	41 \pm 3.1a	46 \pm 6c	101 \pm 8.2c
T2	109 \pm 3.3a	34 \pm 12.6a	12 \pm 2.4a	46 \pm 8.5a	42 \pm 12c	100 \pm 3.3c
T3	109 \pm 2.3a	33 \pm 13.1a	14 \pm 5.6a	27 \pm 12.3c	78 \pm 11a	119 \pm 9b
T4	105 \pm 15.7ab	32 \pm 13.3a	11 \pm 11.6a	28 \pm 9.4c	57 \pm 18b	96 \pm 2.6cd
T5	108 \pm 7a	29 \pm 7.6a	11 \pm 4.6a	25 \pm 15.2c	51 \pm 15b	87 \pm 2.5d
T6	110 \pm 11.2a	32 \pm 18.6a	14 \pm 4.7a	32 \pm 6.1b	72 \pm 19a	118 \pm 3.5b
T7	111 \pm 10.6a	28 \pm 12.6a	15 \pm 5.6a	37 \pm 5.6b	77 \pm 18a	129 \pm 3.1a

T1: Control, T2: Fertilizante químico edáfico, T3: Fertilizante químico edáfico+Fertilizante químico foliar, T4: Fertilizante biológico, T5: Fertilizante biológico+Fertilizante orgánico, T6: Fertilizante biológico+Fertilizante químico edáfico, T7: Fertilizante biológico+Fertilizante químico edáfico+Fertilizante orgánico.

Distribución de biomasa en los diferentes órganos

Hubo un efecto significativo de los tratamientos sobre la distribución de la biomasa en los diferentes órganos ($p < 0.05$) (Fig. 9). Se observó dos grupos de tratamientos que presentaron

patrones similares, el primero de ellos conformado por T1 y T2 que acumularon biomasa principalmente en los tallos, seguido de panojas y raíz respectivamente y el segundo conformado por T3, T4, T5, T6 y T7 que concentraron la biomasa mayormente en la panoja, seguido del tallo.

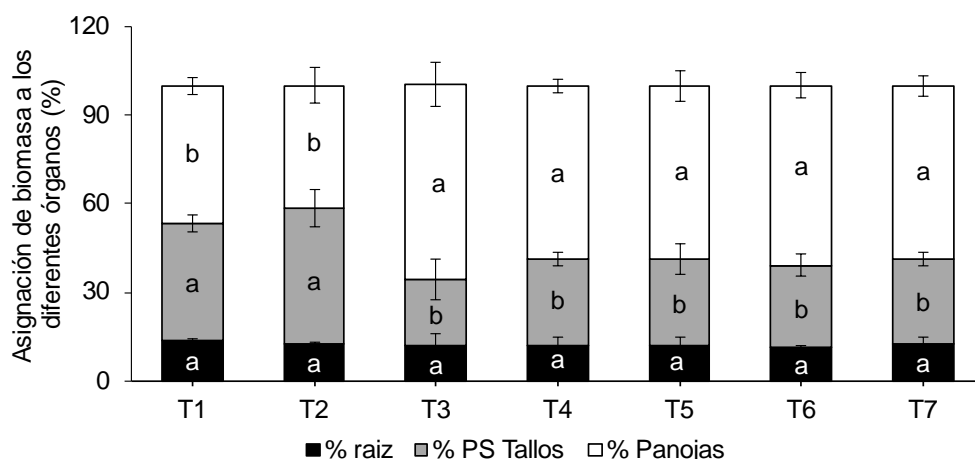


Figura 9. Valores de la asignación porcentual de biomasa hacia los diferentes órganos vegetales: Panojas, tallos y raíz, bajo los diferentes tratamientos. T1: Control, T2: Fertilizante químico edáfico, T3: Fertilizante químico edáfico+Fertilizante químico foliar, T4: Fertilizante biológico, T5: Fertilizante biológico+Fertilizante orgánico, T6: Fertilizante biológico+Fertilizante químico edáfico, T7: Fertilizante biológico +Fertilizante químico edáfico+Fertilizante orgánico; ($p < 0.05$). Letras diferentes sobre las barras representan diferencias estadísticamente significativas. Barras indican la DE. Fuente: Elaboración propia.

Distribución porcentual

Se encontró un efecto significativo de los tratamientos sobre la distribución porcentual del tamaño de grano ($p < 0.05$) (Fig. 10). En cuanto a la acumulación de fotoasimilados en los granos, los tratamientos T1 y T2 tuvieron un comportamiento similar porque el mayor porcentaje se concentró en el grano de tamaño mediano (1.4 mm), seguido del grano grande (1.7 mm) y finalmente del pequeño (1.0 mm) con valores entre 68.2 y 77.2% en grano mediano, 16.2 y 20.4% en grano grande y entre 7 y 11.4% en tamaño pequeño. Hubo otro grupo de tratamientos T3, T4, T5, T6 y T7 que presentaron un patrón similar, donde la mayor proporción de grano se encontró en tamaño grande (1.7 mm), seguido de mediano (1.4 mm) y pequeño (1.0 mm). La distribución porcentual del grano grande estuvo entre 42 y 57%,

tamaño mediano entre 38 y 50% y tamaño pequeño entre 4 y 8%, quien presentó el de mayor porcentaje de grano grande (1.7 mm) fue T7 con 57%.

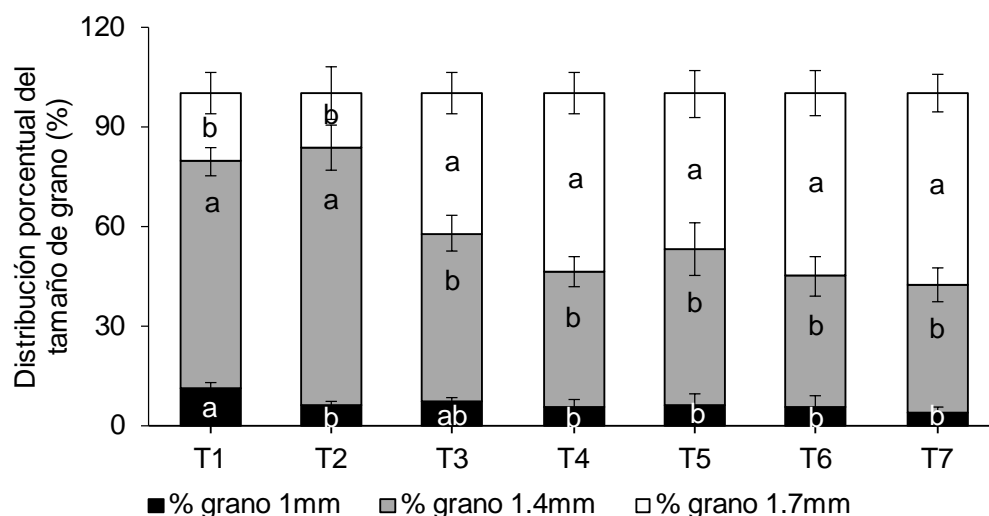


Figura 10. Valores de la distribución porcentual del grano por tamaño. Grano pequeño de 1mm de diámetro (Negro), grano mediano de 1.4mm de diámetro (Gris) y grano grande de 1.7mm de diámetro (Blanco). T1: Control, T2: Fertilizante químico edáfico, T3: Fertilizante químico edáfico+Fertilizante químico foliar, T4: Fertilizante biológico, T5: Fertilizante biológico+Fertilizante orgánico, T6: Fertilizante biológico+Fertilizante químico edáfico, T7: Fertilizante biológico +Fertilizante químico edáfico+Fertilizante orgánico; ($p < 0.05$). Letras diferentes dentro de las barras representan diferencias estadísticamente significativas. Barras indican la DE. Fuente: Elaboración propia.

Rendimiento de grano

Hubo diferencias significativas en el rendimiento bajo los tratamientos evaluados ($p < 0.05$) (Fig. 11). En T7 se encontró significativamente el mayor rendimiento, seguido de T6, T2, T3, T4, T5 y T1 con valores de 1.89, 1.38, 1.23, 1.23, 0.77, 0.72 y 0.45 t.ha⁻¹, respectivamente. Estos tratamientos fueron entre un 4.2, 3.1, 2.7, 2.7, 1.7 y 1.6 veces más altos que T1 (control).

Producción de grano por tamaño de grano

Aunque T3, T4, T5, T6 y T7 no presentaron diferencias significativas en distribución porcentual entre los diferentes tamaños de grano (Fig. 10), T7 tuvo significativamente la

mayor producción de grano grande seguido de T6, T3, T4, T5, T2 y T1 con valores de: 1.09, 0.75, 0.51, 0.41, 0.32, 0.20 y 0.09 t.ha⁻¹, respectivamente (Fig. 11). Estos tratamientos fueron 12.1, 8.3, 5.7, 4.5, 3.5 y 2.2 veces más altos que el control. Con relación a el tamaño mediano, la mayor cantidad se produjo en T2 seguido de T7, T3, T6, T5, T1 y T4 con valores de: 0.95, 0.72, 0.62, 0.55, 0.35, 0.31 y 0.31 t.ha⁻¹, respectivamente. Estos tratamientos fueron 3.1, 2.3, 2, 1.8 y 1.1 veces más altos que el control. Con respecto al tamaño pequeño de grano, la cantidad fue similar entre tratamientos y osciló entre 0.04 y 0.09 t.ha⁻¹.

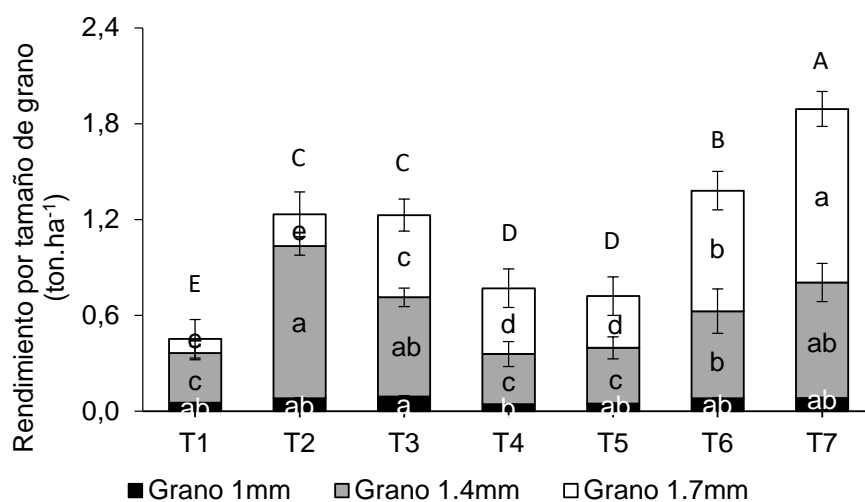


Figura 11. Producción por tamaño de grano (t.ha⁻¹). Grano pequeño de 1mm de diámetro (Negro), grano mediano de 1.4mm de diámetro (Gris) y grano grande de 1.7mm de diámetro (Blanco). T1: Control, T2: Fertilizante químico edáfico, T3: Fertilizante químico edáfico+Fertilizante químico foliar, T4: Fertilizante biológico, T5: Fertilizante biológico+Fertilizante orgánico, T6: Fertilizante biológico+Fertilizante químico edáfico, T7: Fertilizante biológico +Fertilizante químico edáfico+Fertilizante orgánico; (p<0.05). Letras minúsculas diferentes dentro de las barras representan diferencias estadísticamente significativas en la producción de grano por tamaño y letras mayúsculas diferentes sobre las barras representan diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento total del grano entre tratamientos. Barras indican la DE. Fuente: Elaboración propia.

El índice de cosecha presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (p<0.05) (Fig. 12). El IC más alto significativamente lo exhibió T7 seguido de T6, T2, T3,

T5, T4 y T1, con valores de 0.33, 0.23, 0.23, 0.20, 0.16, 0.15 y 0.12, respectivamente, los cuales fueron 2.8, 1.9, 1.9, 1.7, 1.3, 1.2 veces más altos que el control (T1).

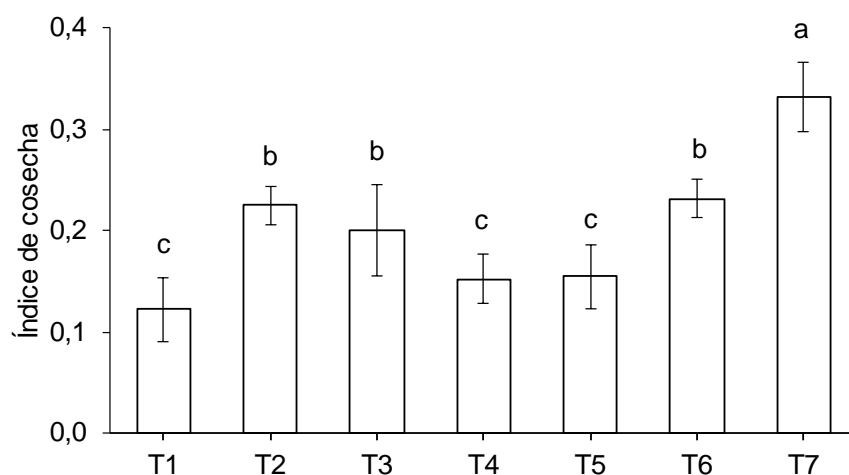


Figura 12. Índice de cosecha: T1: Control, T2: Fertilizante químico edáfico, T3: Fertilizante químico edáfico+Fertilizante químico foliar, T4: Fertilizante biológico, T5: Fertilizante biológico+Fertilizante orgánico, T6: Fertilizante biológico+Fertilizante químico edáfico, T7: Fertilizante biológico +Fertilizante químico edáfico+Fertilizante orgánico; ($p < 0.05$). Letras diferentes dentro de las barras representan diferencias estadísticamente significativas. Barras indican la DE. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Respuesta del cultivo en el control (T1):

Los suelos de la zona donde se llevó a cabo el estudio se formaron a partir de cenizas volcánicas, lo cual le confirió propiedades ácidas, pH ácido, alta capacidad de fijación de fósforo y media a baja disponibilidad de nutrientes (Arifin *et al.*, 2022). Por lo tanto, la oferta mineral del suelo (Tabla 2) no fue suficiente para suplir la demanda del cultivo. Esto conllevó a que, en el tratamiento control (T1), el cultivo no exhibiera un buen desempeño agronómico porque presentó significativamente el menor crecimiento, rendimiento, índice de cosecha y cantidad de grano grande. Estos resultados son concordantes con los estudios realizados por Taaime *et al.* (2024) quienes encontraron que cuando no se aplicó ningún tipo de fertilizante, el rendimiento de la quinua obtenido estuvo entre 0.7 y 1.0 t.ha⁻¹ frente a 4.6 t.ha⁻¹ que se

generaron con la aplicación de compost + estiércol. Por otro lado, variables como la altura de las plantas también se vio afectada donde el promedio para el control osciló entre 39.9 y 54.1cm y donde los demás tratamientos tuvieron alturas entre 74.2 y 78.3 cm. Lo anterior destaca la importancia de la incorporación de insumos para mejorar la nutrición del cultivo, ya que, bajo las condiciones naturales del suelo, el rendimiento y la calidad de las cosechas se pueden limitar (Taaime et., 2024).

Respuesta del cultivo la aplicación de MPCV (T4):

Por su parte, los MPCV aplicados a través de T4 incrementaron significativamente el rendimiento y calidad del grano al generar un mayor porcentaje y cantidad de grano grande en contraste con el control. Los MPCV al interactuar con las raíces de la quinua promovieron un mayor rendimiento y la calidad del grano a través de procesos como la fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes, producción de fitohormonas, y mejora de la resistencia al estrés (Ahmed *et al.*, 2023). Los estudios donde se aplican MPCV en la quinua son consistentes al demostrar que mejoran su desempeño agronómico (Galecio *et al.*, 2023). En la investigación realizada por León-Fajardo (2019) quienes encontraron que *B. pumilus* y *P. polymyxa* y el consorcio de *B. pumilus*, *B. subtilis* y *P. polymyxa* mejoró en un 20% el rendimiento en relación con el control. Por su parte, Youssef et al. (2023) investigaron el efecto de *Aspergillus niger* en el rendimiento de la quinua y encontraron que este microorganismo aumentó el peso seco de la planta entre un 38.7 y 53.2% y el rendimiento de semilla entre 49.1 y 39.5%, en comparación con el control en dos tipos de suelo.

Respuesta del cultivo la aplicación de MPCV (T4) y MPCV + fertilizante orgánico (T5):

A pesar de la ganancia en el rendimiento y tamaño de grano con la aplicación de MPCV, no hubo diferencias significativas entre T4 y T5, aunque en este último tratamiento se haya adicionado materia orgánica. Este resultado se dio porque el contenido de materia orgánica nativa del suelo fue alto (tabla 2) y la dosis aplicada no fue suficiente para realizar un aporte considerable de nutrientes o para mejorar alguna de las propiedades del suelo que impactara en el crecimiento y cosecha del cultivo. Estos resultados indicaron que la incorporación de la materia orgánica puede ser importante siempre y cuando se proporcione en cantidades

mayores. En el estudio de González et al. (2023) se evaluaron dosis de materia orgánica más alta (2, 4, 8 y 12 t.ha⁻¹) provenientes de estiércol de cabra, sobre el rendimiento de grano, compuestos orgánicos y composición mineral de dos variedades de quinua (CICA-17 y Regalona Baer) en condiciones de campo en el Noroeste de Argentina. Los resultados mostraron que la dosis de 4 t.ha⁻¹ de estiércol de cabra aumentó el rendimiento de grano de quinua de 2.1 t.ha⁻¹ a 5.4 t.ha⁻¹ (González *et al.*, 2023).

Respuesta del cultivo la aplicación de fertilizante químico (T2, T3, T6 y T7):

Los tratamientos en los que se incluyó fertilizante de síntesis química T2, T3, T6 y T7 se destacaron porque presentaron rendimientos con valores por encima de 1.2 t.ha⁻¹ y la mayor cantidad de grano grande por encima del control y tratamientos con MPCV (T4 y T5). Este fenómeno se dio porque al proveer una dosis alta e inmediata de nutrientes esenciales, especialmente de nitrógeno, fósforo y potasio, se logró estimular procesos fisiológicos en las plantas mucho más que los inoculantes microbianos y los minerales nativos del suelo. Estos resultados son concordantes con el estudio realizado por Hosseini & Bostani, (2024) quienes demostraron que la aplicación de urea mejoró el rendimiento, peso de 1000 granos y el contenido de clorofila en relación con el uso de MPCV en diferentes concentraciones (0, 0.1, 0.2 y 0.3%). Estos resultados también son similares con la investigación realizada por Deng et al. (2024) donde se determinó que la fertilización con nitrógeno provocó un ciclo productivo más corto y aumentó el rendimiento entre el 16 y 30%, en donde se obtuvo un valor promedio de 3.7 t.ha⁻¹ en una tasa óptima de fertilización 120 kg.ha⁻¹ frente al control. Estos resultados son consistentes al demostrar la importancia de la aplicación de fertilizantes de síntesis química en la obtención de mayores rendimientos y calidad de grano (Taimee *et al.*, 2023). A pesar de que con T2 y T3 se obtuvieron rendimientos e índices de cosecha similares, los nutrientes aplicados foliarmente en T3 estimularon los procesos metabólicos de la planta que direccionaron fotosintatos para una mayor biomasa en la panoja, porcentaje y cantidad de grano grande. Estos resultados son contradictorios con los publicados por Jorfi et al. (2021) quienes hallaron que la aplicación foliar de 4 kg.ha⁻¹ de ZnSO₄ condujo a una mayor producción de granos con un aumento del 94.75% con respecto al control.

Cabe destacar que el segundo mejor tratamiento fue T6 y los resultados se dieron porque la aplicación de fertilizantes químicos proveyó los nutrientes que potencializaron la acción de los MPCV, lo cual generó un efecto positivo en el rendimiento y calidad del grano de las plantas (De Andrade *et al.*, 2023). Esto se debe a que los MPCV requieren su alimento de fuentes externas ya que no son capaces de producir su propio alimento, entonces ante la escases de minerales en el suelo, es imprescindible incorporarlos con fuentes externas.

De los siete tratamientos de fertilización empleados, el de mejores resultados agronómicos fue T7 porque generó el mayor rendimiento, cantidad de grano grande e índice de cosecha y se debió gracias a la sinergia existente entre microorganismos, materia orgánica y NPK. Por un lado, los fertilizantes de síntesis química proporcionaron un suministro inmediato de nutrientes y la materia orgánica mejoraron las condiciones químicas y físicas del suelo (Ibañez *et al.*, 2023). El incremento de la CIC y porosidad brindan mayor capacidad para intercambiar agua, aire y nutrientes con la planta. Además, los resultados señalan que la materia orgánica proporcionó un entorno adecuado para la supervivencia de MPCV, los cuales al interactuar con las raíces de la quinua realizaron procesos como la fijación de nitrógeno, producción de fitohormonas, solubilización de nutrientes y mejora de la resistencia al estrés (Granados, 2021). Entonces la interacción y complementariedad de las funciones de cada insumo contribuyó a que las plantas presentaran el mejor desempeño agronómico.

En el estudio realizado por Moradi *et al.* (2024) se exploró estrategias para potenciar el efecto de fertilizantes químicos con la aplicación de vermicompost (VC) y estiércol de vaca (CM) en diferentes proporciones. Los resultados arrojaron que al utilizar 65-80% de NPK, 100% de CM y 50-100% de VC, el rendimiento de las semillas de quinua alcanzó los mejores resultados agronómicos y se registró una reducción significativa en la pérdida de N (Moradi *et al.*, 2024). Por su parte, el efecto de la aplicación de MPCV, vermicompost y fertilizante químico sobre el rendimiento de los cultivos y salud del suelo en maíz y trigo fue estudiado por Zhou *et al.* (2012). Los resultados de la investigación mostraron que el rendimiento con tratamientos compuestos por MPCV, vermicompost y fertilizante químicos aumentó entre un 26,4% y un 44.6% para el trigo y entre un 12.5% y un 40.8% para el maíz en comparación con las parcelas donde se aplicó solo fertilizante químico (Zhou *et al.*, 2022). La importancia

de estos resultados radica en la capacidad de los tratamientos con MPCV y combinaciones de fertilizantes y materia orgánica para incrementar no solo el tamaño de los granos, sino también el rendimiento total.

APORTE DE LA INVESTIGACIÓN AL OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Aporte de la investigación:

La investigación aportó significativamente al objetivo general y a los objetivos específicos. Los resultados obtenidos muestran que los fertilizantes biológicos y combinados no solo mejoran el tamaño del grano, sino que también incrementan el rendimiento del cultivo. Además, los hallazgos pueden ser utilizados para desarrollar guías y recomendaciones para los agricultores, facilitando la transferencia del conocimiento y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles en la región.

Principales conclusiones de la investigación

Eficacia de los fertilizantes biológicos: Los fertilizantes biológicos, cuando se utilizan de manera adecuada, pueden tener el potencial de mejorar tanto el tamaño del grano como el rendimiento de la quinua, lo que destaca su importancia como una alternativa sostenible en la agricultura.

Sostenibilidad agrícola: La aplicación de fertilizantes biológicos contribuye a una agricultura más sostenible, reduciendo la dependencia de los fertilizantes químicos y minimizando los impactos ambientales negativos.

Transferencia de conocimiento: Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para desarrollar programas de transferencia de tecnología que beneficien a los agricultores locales, mejorando su productividad y calidad de vida.

Apreciación científica de la investigación

Aspectos positivos

Diseño experimental robusto: El uso de un diseño experimental de Bloques Completos al Azar con varias repeticiones proporciona datos confiables y válidos.

Relevancia práctica: La investigación aborda problemas reales y urgentes en la agricultura local, ofreciendo soluciones prácticas y aplicables.

Aspectos negativos

Limitaciones geográficas: Los resultados pueden no ser completamente extrapolables a otras regiones con diferentes condiciones edafoclimáticas.

Seguimiento a largo plazo: Sería beneficioso realizar estudios de seguimiento a largo plazo para evaluar los efectos persistentes de los fertilizantes biológicos.

Esta investigación ofrece una base sólida para la implementación de prácticas agrícolas más sostenibles en el cultivo de la quinua en el Cauca, contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la región y fortaleciendo la seguridad alimentaria local.

CONCLUSIONES

La investigación realizada evaluó el impacto de varios fertilizantes en el tamaño y rendimiento del grano de quinua en el municipio de Silvia, Cauca. Tanto la aplicación individual de fertilizantes biológicos, orgánicos y de síntesis química, como su uso combinado, mostraron una influencia significativa en las variables agronómicas de la quinua. Los fertilizantes biológicos mejoraron notablemente el tamaño y la calidad del grano. Sin embargo, fue la fertilización integrada, que combina insumos biológicos, orgánicos y químicos, la estrategia más eficaz, alcanzando el mayor rendimiento y el porcentaje más alto de granos grandes (57 %).

El tratamiento integrado (T7) destacó al lograr un rendimiento promedio de 4.17 t.ha⁻¹, superando a los demás tratamientos. Los fertilizantes químicos aceleraron la respuesta del cultivo, mientras los orgánicos y biológicos mejoraron las propiedades del suelo, garantizando así la sostenibilidad a largo plazo.

Finalmente, con los resultados obtenidos se desarrolló una guía de bolsillo destinada a transferir el conocimiento a los agricultores de la región, proporcionándoles herramientas prácticas basadas en estos hallazgos. Esta guía busca fomentar el uso eficiente de fertilizantes y promover prácticas agrícolas sostenibles, mejorando la competitividad y sostenibilidad del sector quinuero en Cauca.

RECOMENDACIONES

La propuesta es replicable si se ajusta a las condiciones locales mediante estudios previos de suelos y se adopta la fertilización integrada como base. Las futuras investigaciones deben seguir explorando dosis y combinaciones más efectivas para garantizar la sostenibilidad y alta productividad del cultivo de quinua.

Las recomendaciones para la replicabilidad de la propuesta a otras organizaciones y futuras investigaciones pueden enfocarse en los siguientes aspectos:

1. **Fertilización integrada como estrategia replicable:** Los mejores resultados se obtuvieron con la fertilización integrada (T7), que combinó fertilizantes biológicos, químicos y materia orgánica. Esta estrategia puede ser fácilmente replicada en diferentes regiones y condiciones agrícolas, siempre y cuando se adapten las dosis a las condiciones locales del suelo y clima. Para otras organizaciones, la implementación de una fertilización integrada similar puede contribuir a mejorar el rendimiento y la calidad del cultivo de quinua e investigar su efecto en otros cultivos.
2. **Desarrollo de estudios para ajustar dosis de materia orgánica:** Si bien se observó que la adición de materia orgánica tuvo un efecto limitado en ciertas combinaciones, futuras investigaciones deberían evaluar el uso de dosis más altas de materia orgánica. Esto es especialmente importante en suelos con baja materia orgánica o donde se busque mejorar la estructura del suelo y la capacidad de retención de nutrientes.
3. **Investigación sobre el uso de microorganismos específicos:** Los fertilizantes biológicos, basados en microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV), demostraron ser eficaces en mejorar el rendimiento y calidad del grano. Se

recomienda continuar investigaciones que evalúen nuevas combinaciones de cepas microbianas y su interacción con diferentes tipos de fertilizantes, tanto orgánicos como químicos, para optimizar aún más los resultados en diversos suelos y climas.

4. **Transferencia de conocimiento agrícola:** Los resultados del estudio pueden ser utilizados para desarrollar guías de manejo de fertilización en cultivos de quinua, dirigidas a agricultores de zonas similares. Las organizaciones agrícolas pueden implementar programas de capacitación y asistencia técnica para difundir estas prácticas sostenibles entre los productores locales.

5. **Adaptación de prácticas según análisis de suelo:** Dado que los suelos andisoles presentan desafíos específicos, como la fijación de fósforo y baja disponibilidad de nutrientes, las organizaciones y futuras investigaciones deben enfocarse en adaptar las recomendaciones a las características químicas y físicas particulares de cada zona agrícola, maximizando el potencial productivo a través de la personalización de las prácticas de fertilización.

BIBLIOGRAFÍA

- 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), 4738416.
- Agroactivo Colombia. (2017). *Fincha técnica Agrimins Completo*. Web Site <https://agroactivocol.com/wp-content/uploads/2017/03/Agrimins-completo.pdf>.
- Ahmed, T.; Noman, M.; Qi, Y.; Shahid, M.; Hussain, S.; Masood, H.A.; Xu, L.; Ali, H.M.; Negm, S.; El-Kott, A.F.; et al. *Fertilization of Microbial Composts: A Technology for Improving Stress Resilience in Plants*. *Plants* **2023**, 12, 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>.
- Al-Naggar, A. M. M., Atta, M. M., Abd El-Moneim, M. L., & Al-Metwally, M. S. (2022). *Differential response of Chenopodium quinoa genotypes to organic and chemical fertilizer combined with different N application rates*. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 23(1&2), 54-81. <https://doi.org/10.56557/PCBMB/2022/v23i1-27381>.
- Alsaady, M. H. M., Salim, H. A., Abdulrazzaq, A. K., Saleh, U. N., Jassim, N. H., Hamad, A. R., ... & Hassan, A. F. (2020). *Response of cabbage plants to foliar application of yeast suspension and nitrogen fertilizer*. *Ecology, Environment and Conservation*, 26(2), 832-836.
- Arifin, M., Devnita, R., Anda, M., Goenadi, D. H., & Nugraha, A. (2022). *Characteristics of Andisols developed from andesitic and basaltic volcanic ash in different agro-climatic zones*. *Soil Systems*, 6(4), 78.
- Balaguera, A. M. L. (2020). *Comportamiento Volumétrico de un Suelo no Saturado Derivado de Cenizas Volcánicas del Departamento del Cauca, Colombia*.
- Basantes Insuasti, E. V. (2023). *Diseño de sistema de gestión de calidad basado en la norma ARCSA-DE-067-2015-GGG para cumplimiento de requisitos y procesos en la línea de producción de quinua pop en "COPROBICH"*.

- Ben Hassen, T., & El Bilali, H. (2022). *Impacts of the Russia-Ukraine war on global food security: towards more sustainable and resilient food systems?*. *Foods*, 11(15), 2301.
- Benaffari, W., Boutasknit, A., Anli, M., Ait-El-Mokhtar, M., Ait-Rahou, Y., Ben-Laouane, R., ... & Meddich, A. (2022). *The native arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost-based organic amendments enhance soil fertility, growth performance, and the drought stress tolerance of quinoa*. *Plants*, 11(3), 393.
- Blue Planet LABS. (2018). *Ficha técnica de ACF-SR 1.1 SL y ACF SR PLUS (+)*. New Jersey, USA.
- Blue Planet LABS. (2024). *Agriculture solutions*. Web site: <https://www.blueplanetlabs.com/solution/agriculture>.
- Caro, F. A. A. (2024). *Análisis de abonos orgánicos y químicos*. *Revista Teinnova*, 8, 51-59.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). *Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica*. *Acta botánica mexicana*, (129).
- Chávez, L. F. (2017). *Desarrollo de nuevas recomendaciones tecnológicas para contribuir con la competitividad y sostenibilidad del sector quinuero del departamento del Cauca*. AGROSAVIA.
- Cruz, D. A. G., & Pinilla, G. J. V. (2021). *Factores para co-evaluar la eficacia de la política de inversión aplicada a la cadena productiva de la quinua en El Cauca*. *Ixmati*, (9), 11-50.
- De Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). *Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production*. *Microorganisms*, 11(4), 1088.
- De la Cruz-Arango, D. (2023). *La quinua en el Perú: Pseudocereal andino, alimento de generaciones presentes y futuras*. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 11(1), 1-3.
- Deng, Y., Zheng, Y., Lu, J., Guo, Z., Sun, X., Zhao, L., ... & Wang, C. (2024). *Effects of Different N Fertilizer Doses on Phenology, Photosynthetic Fluorescence, and Yield of Quinoa*. *Agronomy*, 14(5), 914.

- Du, Y., Cui, B., Wang, Z., Sun, J., & Niu, W. (2020). *Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: A meta-analysis*. *Catena*, 193, 104617.
- El-Gamal, B. A., Abu El-Fotoh, H. M., & Hamed, M. A. (2020). *Impact of organic and bio-fertilizers on soil health and production of quinoa and soybean*. *Middle East. J. Agric. Res*, 9, 828-847.
- Encines Chaidez, O. V., Ayala-Tafoya, F., Parra Delgado, J. M., Valenzuela López, M., López Urquidez, G. A., & Yáñez Juárez, M. G. (2022). *Producción de chile jalapeño en mini-túnel en respuesta a la fertilización sintética, orgánica y carbónica*. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(3).
- Franco Aguilar, A., Arias Giraldo, S., Anaya García, S. E., & Muñoz Quintero, D. (2020). *Perspectivas tecnológicas y nutricionales de la quinua (Chenopodium quinoa): un pseudocereal andino funcional*. *Rev Esp Nutr Comunitaria*, 27(3), 229-235.
- Galecio-Julca, M., Neira-Ojeda, M., Chanduvi-García, R., Peña-Castillo, R., Álvarez-Bernaola, L. A., Granda-Wong, C., ... & Morales-Pizarro, A. (2023). *Efecto de la eficacia de los microorganismos nativos y la composta en tres pisos altitudinales en el cultivo de quinua (Chenopodium quinoa) variedad INIA 415-Pasankalla*. *Terra Latinoamericana*, 41.
- Gamboa, C., Bojacá, CR, Schrevens, E., & Maertens, M. (2020). *Sostenibilidad de la producción de quinua a pequeña escala en los Andes peruanos*. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121657.
- García Castro, J. D. (2022). *Efecto de bacterias diazótroficas y su importancia para el rendimiento de los cultivos de ciclo corto* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2021).
- García-Parra, Miguel, Cuellar-Rodríguez, Luz Ángela, & Balaguera-López, Helber Enrique. (2022). *Arbuscular mycorrhiza symbiosis in quinoa (Chenopodium quinoa Willd.): A systematic review*. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 75(1), 9853-9865. Epub January 31, 2022. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n1.95754>.
- González, J.A.; Yousif, S.K.M.; Erazzu, L.E.; Martínez Calsina, L.; Lizarraga, E.F.; Omer, R.M.; Bazile, D.; Fernandez-Turiel, J.L.; Buedo, S.E.; Rejas, M. (2023).

Effects of Goat Manure Fertilization on Grain Nutritional Value in Two Contrasting Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) Varieties Cultivated at High Altitudes. Agronomy 13, 918. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030918>.

- González, K. (2018). *Fertilizantes de síntesis química y herbicidas, ¿Son buenos o malos?*. <https://zoovetesmpasion.com/pastos-y-forrajes/fertilizantes-quimicos-y-herbicidas-buenos-o-malos>.
- Granados Thorin, N. (2021). *Evaluación de efectividad de bacterias promotoras de crecimiento vegetal en la variedad de arroz F67 (Oryza sativa)*.
- Hernández Lara, A. (2023). *Estudio del microbioma para el uso de compost agroindustriales adaptados al control biológico de enfermedades en lechuga y espinaca*.
- Hidalgo Moya, L. M. (2023). *Análisis de grupos funcionales de microorganismos asociados a la rizosfera de dos localidades productivas de maíz (zea mays l.) en el piso altitudinal de 2910 msnm. Cotopaxi 2023* (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).
- Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. (2021). *Foliar application of nanoparticles: mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts*. Environmental Science: Nano, 8(5), 1196-1210.
- Hosseini, S. H., & Bostani, A. (2024). *Quantitative and Qualitative Responses of Quinoa to Soil Application of Growth-promoting Microorganisms Under Water Stress*. Journal of Crop Health, 76(3), 713-724.
- Hussain, M. I., Farooq, M., Syed, Q. A., Ishaq, A., Al-Ghamdi, A. A., & Hatamleh, A. A. (2021). *Botany, nutritional value, phytochemical composition and biological activities of quinoa*. Plants, 10(11), 2258.
- Ibáñez, A.; Garrido-Chamorro, S.; Vasco-Cárdenas, M.F.; Barreiro, C. From Lab to Field: Biofertilizers in the 21st Century. *Horticulturae* 2023, 9, 1306. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121306>.
- Johnson, V. J., & Mirza, A. (2020). *Role of Macro and Micronutrients in the Growth and Development of Plants*. Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci, 9, 576-587.
- Jorfi, A., Alavifazel, M., Gilani, A., Ardakani, MR, & Lak, S. (2022). *Rendimiento y desempeño morfofisiológico de genotipos de quinua (Chenopodium quinoa)*

afectados por fósforo y zinc. Journal of Plant Nutrition, 45 (16), 2432–2446. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2035756>.

- Kiyani, H. F., Tatari, M., Tokalo, M. R., Salehi, M., & Ghalibaf, K. H. H. (2022). *The effect of deficit irrigation and fertilizer on quantitative and qualitative yield of quinoa (Chenopodium quinoa)*. Italian Journal of Agrometeorology, 1, 83-99.
- Ledezma, A. G., & Coronado, M. A. G. (2023). *Efecto de microorganismos promotores de crecimiento vegetal y yeso agrícola en el cultivo de higo*. CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 12(23), 1-21.
- León Ttacca, B., Ortiz Calcina, N., Pauro Flores, L., Borja Loza, R., Mendoza-Coari, P., & Palao Iturregui, L. (2022). *Inoculation methods of native strains of Trichoderma sp. and their effect on the growth and yield of quinoa*. Revista De La Facultad De Agronomía, 39(4), e223955. doi: 10.47280/RevFacAgron(LUZ).v39.n4.10.
- León-Fajardo, M., Mancilla-Felipez, J. D., & Ortuño-Castro, F. N. (2019). *Evaluación de bacterias endófitas promotoras de crecimiento en el cultivo de quinua*. Journal of the Selva Andina Biosphere, 7(2), 88-99.
- Loayza-Aguilar, J., Blanco-Capia, L. E., Bernabé-Uño, A., & Ayala-Flores, G. (2020). *Saberes locales sobre tecnologías y estrategias de producción agropecuaria para la resiliencia climática*. Journal of the Selva Andina Biosphere, 8(1), 32-41.
- McDonnell, E. (2023). *Rendering quality technical: modern quinoa, modern farmers, and the moral politics of quality standards*. Agriculture and Human Values, 40(1), 305-315.
- Mier-Tous, J. M., Pineda-Vides, F., Hernández-Ureche, J., Troncoso-Palacio, A., Andrade-Perez, J., & Padilla-Barrios, J. I. (2023). *Una revisión preliminar de la literatura sobre los retos en la agricultura sostenible de América Latina*. Boletín de Innovación, Logística y Operaciones, 5(1), 95-105.
- Moradi, S., Rokhzadi, A., Mohammadi, K., & Pasari, B. (2024). *Reduced Nitrogen Loss and Sustained Seed Yield of Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) by Optimizing the Use of NPK, Cow Manure, and Vermicompost*. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 24(1), 572-585.

- Morales, H., López, J., & Díaz, P. (2020). *The role of organic matter in quinoa production under different soil conditions*. *Agricultural Sciences*, 11(7), 551-563. <https://doi.org/10.4236/as.2020.117038>.
- Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., & Yan, D. (2021). *Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 104-118.
- Pahalvi, H. N., Rafiya, L., Rashid, S., Nisar, B., & Kamili, A. N. (2021). *Chemical fertilizers and their impact on soil health*. *Microbiota and Biofertilizers*, Vol 2: Ecofriendly tools for reclamation of degraded soil environs, 1-20.
- Pasha, B. A., Kumar, N. L., Salmankhan, R. M., & Naik, L. K. (2023). *Effect of Beneficial Micro-organisms on Yield of Quinoa (Chenopodium quinoa Wild) Based on Relationship among Nutrients Observed in Semi-arid Alfisols*. *Mysore Journal of Agricultural Sciences*, 57(1).
- Peñafiel Troya, J. J. (2020). *Importancia de la fertilización edáfica a base de potasio sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo de banano (Musa × paradisiaca)* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2020).
- Pérez Méndez, D. F. (2021). *Evaluación del efecto de la aplicación de micorrizas y microorganismos solubilizadores de fósforo en la producción de tomate riñón (Solanum Lycopersicum), variedad Sheila Victory bajo invernadero en el cantón Mira*. UPEC.
- Ramos Quispe, A. R. (2022). *Caracterización del manejo agronómico de las variedades de quinua para la elaboración de quinua pop en Arequipa*.
- Rashid, N., Khan, S., Wahid, A., Basra, S. M. A., Alwahibi, M. S., & Jacobsen, S. E. (2022). *Impact of natural and synthetic growth enhancers on the productivity and yield of quinoa (Chenopodium quinoa willd.) cultivated under normal and late sown circumstances*. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(4), 552-566.
- Reyna, E. N., Villalobos, J. A. M., García, V. C., Paredes, J. C., & Torres, S. P. M. (2021). *Actividad enzimática del suelo durante el proceso de mineralización de diferentes enmiendas orgánica*. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 3(2), 3-11.

- Riascos-Vallejos, A. R., Crespo, G., Guerrero-Guerrero, E. M., & Medina-Mesa, Y. (2022). *Efecto de la fuente de alimento en la composición química del vermicompost de lombriz roja californiana (Eisenia foetida)*. Cuban Journal of Agricultural Science, 56(3).
- Rojas A, Ramírez M, Lora R, Amézquita E, Sánchez L, García B, Osorio J. *Fertilización en diversos cultivos: quinta aproximación*. ICA, Ed. Produmedios, Mosquera, Colombia, 1992, 52-57.
- Rosero Realpe, M., & Giraldo Parra, N. (2023). *Caracterización de actividad promotora de crecimiento vegetal en bacterias aisladas de la compostera de la Universidad Libre seccional Pereira*.
- Rosero, J., Vélez, J., Burbano, H., & Ordóñez, H. (2019). *Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia*. Agro sur, 47(3), 15-25.
- Rudistein, A. (2023). *Fertilizantes: ventajas en la producción*.
- Salcedo Mayta, S. M., Canihua Rojas, J., Quispe Huincho, M. R., & Cosme de la Cruz, R. C. (2022). *Influencia de las enmiendas orgánicas en el suelo y el comportamiento agronómico de Chenopodium quinoa Willd. en el Altiplano peruano*. Agroindustrial Science.
- Santos-Martinez, T. L. (2020). *Mercado potencial para la Quinoa colombiana*.
- Solano, J., González, J., Collinao, M., Borie, F., & Castillo, C. (2021). *Arquitectura radical y estados fenológicos de cultivos andinos quínoa, amaranto, lupino y alforfón en un Andisol del sur de Chile*. Idesia (Arica), 39(2), 23-30.
- Soria Martínez, R. (2023). *Estudio del efecto de enmiendas orgánicas sobre la funcionalidad del suelo, y patrones de emisión y fijación de CO₂ en tecnosuelos restaurados en una cantera caliza en clima semiárido*.
- Srivastav, A. L. (2020). *Chemical fertilizers and pesticides: role in groundwater contamination*. In *Agrochemicals detection, treatment and remediation* (pp. 143-159). Butterworth-Heinemann.
- Taaime, N., El Mejahed, K., Oukarroum, A. et al. *Efectos residuales de los fertilizantes a base de compost y estiércol en la producción de quinua y la absorción*

de nutrientes. J Soil Sci Plant Nutr **24** , 4338–4348 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s42729-024-01838-2>.

- Taaime, N., Rafik, S., El Mejahed, K., Oukarroum, A., Choukr-Allah, R., Bouabid, R., & El Gharous, M. (2023). *Worldwide development of agronomic management practices for quinoa cultivation: a systematic review*. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1215441.
- Ticona, J. A., Arocutipá, V. A., Añamuro, G. C., Torres, A. C., Paniagua, R. A. Q., & Chino, G. A. (2022). *Sabiduría tradicional para la crianza de cultivo de quinua (Chenopodium Quinoa Willd) y uso en las comunidades aymaras (Puno-Perú)*. In *Anales de geografía de la Universidad Complutense* (Vol. 42, No. 1, p. 11). Universidad Complutense de Madrid.
- Toubali, S., Ait-El-Mokhtar, M., Boutasknit, A., Anli, M., Ait-Rahou, Y., Benaffari, W., ... & Meddich, A. (2022). *Root reinforcement improved performance, productivity, and grain bioactive quality of field-droughted quinoa (Chenopodium quinoa)*. *Frontiers in plant science*, 13, 860484.
- Valdivia-Cea, W., Bustamante, L., Jara, J., Fischer, S., Holzapfel, E., & Wilckens, R. (2021). *Efecto de la disponibilidad de agua en el suelo sobre parámetros fisiológicos, rendimiento y calidad de semilla en cuatro genotipos de quinua (Chenopodium quinoa Willd.)*. *Agronomía* , 11 (5), 1012.
- Velasco Salas, A. I. (2021). *Inoculación de compost con microorganismos solubilizadores de fosfato y su efecto sobre la disponibilidad del fósforo*.
- Venica, J. C. (2021). *Estudio del agregado de hormonas y microorganismos de la rizósfera en el desarrollo de plantines de palta (Persea americana Mill) en línea de injertera*.
- Walsh-Dilley, M. (2020). *Resilience compromised: Producing vulnerability to climate and market among quinoa producers in Southwestern Bolivia*. *Global Environmental Change*, 65, 102165.
- Wang N, Wang F, Shock CC, Meng C, Qiao L. *Efectos de las prácticas de manejo en el crecimiento, el rendimiento y la calidad de las semillas de quinua*. *Agronomía* . 2020; 10(3):445. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030445>.

- Wang, X., Deng, S., Zhou, Y., Long, J., Ding, D., Du, H., ... & Tie, B. Q. (2021). *Application of different foliar iron fertilizers for enhancing the growth and antioxidant capacity of rice and minimizing cadmium accumulation*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 7828-7839.
- WeatherSpark. "Clima promedio en Silvia, Colombia durante todo el año." WeatherSpark, <https://es.weatherspark.com/y/21478/Clima-promedio-en-Silvia-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>. Accessed 12 may 2024.
- Xuan, L. N. T., Huyen, N. P. T., Thu, L. T. M., Thuy, V. T. B., Tuan, L. M., Quang, L. T., ... & Khuong, N. Q. (2024). *Supplementation of P-solubilizing purple nonsulfur bacteria, Rhodopseudomonas palustris improved soil fertility, P nutrient, growth, and yield of Cucumis melo L*. *Open Agriculture*, 9(1), 20220247.
- Youssef, S. M., Shaaban, A., Abdelkhalik, A., Abd El Tawwab, A. R., Abd Al Halim, L. R., Rabee, L. A., ... & Hemida, K. A. (2023). *Compost and phosphorus/potassium-solubilizing fungus effectively boosted quinoa's physio-biochemical traits, nutrient acquisition, soil microbial community, and yield and quality in normal and calcareous soils*. *Plants*, 12(17), 3071.
- Zamani, Z., Zeidali, E., Alizadeh, HA y Fathi, A. (2023). *Efecto del estrés por sequía y la fertilización química nitrogenada en las propiedades de las raíces y el rendimiento de tres cultivares de quinua (Chenopodium quinoa Willd)*. *Crop Science Research in Arid Regions* , 5 (2), 487-500. doi: 10.22034/csrar.2023.353966.1261.
- Zhou, Z., Zhang, S., Jiang, N., Xiu, W., Zhao, J., & Yang, D. (2022). *Effects of organic fertilizer incorporation practices on crops yield, soil quality, and soil fauna feeding activity in the wheat-maize rotation system*. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1058071.