

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI



FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

Tema: "Evaluación del rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola con la aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro Experimental San Francisco – UPEC"

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del
título de Ingeniera en Agropecuaria

AUTOR: Alba Pillajo Viky Samanta

TUTOR: Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander, MSc.

Tulcán, 2026.

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que la estudiante Alba Pillajo ViKy Samanta con el número de cédula 1728218445 ha desarrollado el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación del rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola con la aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro experimental San Francisco – UPEC"

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuesta en el Reglamento de la Unidad de Integración Curricular, Titulación e Incorporación de la UPEC, por lo tanto, autorizo la presentación de la sustentación para la calificación respectiva

Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander, MSc.

TUTOR

Tulcán, diciembre de 2025

AUTORÍA DE TRABAJO

El presente Trabajo de Integración Curricular constituye un requisito previo para la obtención del título de Ingeniero en la Carrera de agropecuaria de la Facultad de Industrias Agropecuarias y Ciencias Ambientales

Yo, Viky Samanta Alba Pillajo con cédula de identidad número 1728218445 respectivamente declaro que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.



Viky Samanta Alba Pillajo

AUTORA

Tulcán, enero de 2026

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo Alba Pillajo Viky Samanta declaro ser autora de los criterios emitidos en el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación del rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola con la aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro experimental San Francisco – UPEC " y eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes de posibles reclamos o acciones legales.



Alba Pillajo Viky Samanta

AUTORA

Tulcán, enero de 2026

AGRADECIMIENTO

Con profunda gratitud, escribo estas líneas desde un lugar donde habitan la nostalgia, el amor y la memoria de cada paso recorrido.

En primer lugar, agradezco a Dios porque gracias a él tuve la fortaleza de resistir cuando los días pesaban, porque aprendí a sostenerme en la distancia y a habitar la soledad en una ciudad ajena. Porque hubo batallas silenciosas que no supe o no pude contar, pero su presencia en mi me permitió continuar y seguir adelante.

Asimismo, nada de este camino habría sido posible sin el pilar más grande de mi vida: mi familia. A mis padres, Fabián Alba y Erlinda Pillajo, mis compañeros de por vida, les agradezco por su amor incondicional, su comprensión infinita y su apoyo constante en todos los ámbitos. Ustedes fueron mi sostén incluso en la distancia; su fe en mí fue la fuerza que me levantó cuando las dudas intentaron vencerme.

De igual manera, a mi hermano mayor, Darwin Achiña, le expreso una gratitud que nace del corazón. Más que un hermano, fuiste un segundo padre para mí, quien me defendió en momentos difíciles, quien confió en mí cuando más lo necesitaba y quien, con su apoyo incondicional, fortaleció mi autoestima y mi valentía, su presencia marcó profundamente mi trayecto.

Igualmente, agradezco a mi cuñada, Lizbeth Morocho, por su acompañamiento constante, por sus palabras oportunas, sus consejos y el aliento que me brindó en los momentos más frágiles. Tu apoyo me dio seguridad cuando más la necesité. Agradezco profundamente su presencia en mi vida.

De manera muy especial, agradezco a mi hermana menor, Poleth Alba, quien demostró una fortaleza admirable durante todo este tiempo, con una madurez que me llena de orgullo, gracias por confiar en mí, por ser mi mejor amiga y mi lugar seguro.

Asimismo, expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutor, MSc. Guillermo Jácome, por ser mi guía durante este proceso. Gracias por su paciencia, sus consejos y el acompañamiento tanto en el desarrollo de esta tesis como en el aprendizaje

compartido en las aulas, su conocimiento, su vocación y su disposición para enseñar lo engrandecen cada día más como profesional y como persona.

De igual manera a todos los docentes de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, por su paciencia, conocimiento y por ser clave para formarme en mi carrera profesional.

De manera especial, llevo plasmadas en mi corazón a dos amigas: Ángeles Ramírez y Nicol Cando, gracias por enseñarme el verdadero significado de la amistad, por brindarme el cariño de una hermana y, en ocasiones, el afecto protector de una madre, gracias por cuidarme en este trayecto lejos de mi familia y por demostrarme que el amor entre hermanas puede existir aun sin compartir la misma sangre.

Finalmente, agradezco a la vida por sostenerme en el lugar en el que hoy me encuentro, por permitirme conocer a varias personas que se cruzaron en mi camino, cada una con un propósito, cada una dejando una enseñanza, aunque algunas ya no están a mi lado, de todas me llevo una parte porque comprendí que todos estamos de paso y que incluso las despedidas dejan lecciones muy valiosas, por todo ello, solo queda gratitud.

A todos ustedes, gracias, este logro también les pertenece.

“La lucha es larga, pero la esperanza no se pierde”

Tránsito Amaguaña

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud, a mis padres, Fabián y Erlinda, porque son ustedes quienes me han formado, quienes me construyeron con valores, fortaleza y principios que hoy me permiten estar aquí, cumpliendo mis sueños y esforzándome cada día por ser una persona de bien, su amor, su ejemplo y su entrega han sido la base firme sobre la que he levantado cada uno de mis logros.

La dedico también a mi hermano Darwin, porque él, más que nadie, me enseñó que todo es posible cuando uno se lo propone, sigo su legado con orgullo, porque es mi ejemplo a seguir, mi referencia de lucha, constancia y valentía, su vida y su forma de enfrentar los desafíos marcaron profundamente mi camino.

Finalmente, esta tesis es para mi hermana Poleth, porque, así como él fue mi ejemplo, hoy yo deseo ser el suyo, para que nunca olvide que, por más difícil que se ponga la vida, jamás debe cerrarse a la superación, que sepa que los sueños se alcanzan con esfuerzo, fe y determinación, y que todo es posible cuando uno cree en sí mismo.

“Todo lo vivido tuvo un propósito, incluso aquello
que en su momento no comprendí”

Viky Alba

ÍNDICE

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
I. EL PROBLEMA	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.3. JUSTIFICACIÓN	17
1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	18
1.4.1 Objetivo General.....	18
1.4.2 Objetivos especificos.....	19
1.4.3 Preguntas de investigación.....	19
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	20
2.2. MARCO TEÓRICO	22
2.2.1 Origen del cultivo de papa.....	22
2.2.2 Taxonomía del cultivo	23
2.2.3 Morfología	23
2.2.4 Requerimiento edafoclimático.....	25
2.2.5 Material genetico y variedades	27
2.2.6 Nutricion vegetal y estrategias de fertilización	29
2.2.7 Bioinsumos	31
III. METODOLOGÍA	34
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	34
3.1.1. Enfoque	34
3.1.2. Tipo de Investigación	34
3.2. HIPÓTESIS	34

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	35
3.3.1. Definición de las variables.....	35
3.3.2. Operacionalización de las variables	36
3.4. MÉTODOS UTILIZADOS	38
3.4.1. Área de estudio	38
3.4.2. Tratamientos del diseño experimental	38
3.4.3. Características del diseño experimental.....	39
3.4.4. Distribución y características del experimento	39
3.4.5. Población y muestra de la investigación	40
3.4.6. Procedimientos.....	41
3.4.7. Variables evaluadas.....	42
3.4.7.1. Altura de planta.....	42
3.4.7.2. Número de tallos.....	42
3.4.7.3. Diámetro del tallo	42
3.4.7.4. Rendimiento por parcela neta	43
3.4.7.5. Clasificación por categorías.....	43
3.4.7.6. Análisis costo - beneficio	43
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. RESULTADOS	45
4.1.1. Altura de planta	45
4.1.2. Número de tallos.....	46
4.1.3. Diámetro de tallo	46
4.1.4. Número de tubérculos	48
4.1.5. Peso promedio de tubérculo por categorías.....	49
4.1.6. Rendimiento por ha.....	49
4.1.7. Análisis costo - beneficio.....	50
4.2. DISCUSIÓN	53

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
5.1. CONCLUSIONES	59
5.2. RECOMENDACIONES	59
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
VII. ANEXOS	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía del cultivo de papa	23
Tabla 2. Operacionalización de variables	36
Tabla 3. Tratamientos del experimento	38
Tabla 4. Características del experimento	39
Tabla 5. Análisis de varianza para la altura de planta (30 a 105 dds)	45
Tabla 6. Prueba de Tukey al 5% para la altura de planta (90 a 105 dds)	46
Tabla 7. Análisis de varianza para el número de tallos (30 a 105 dds)	46
Tabla 8. Análisis de varianza para el diámetro de tallo (30 a 105 dds)	47
Tabla 9. Prueba de Tukey al 5% para diámetro de tallo (75 a 105 dds)	47
Tabla 10. Análisis de varianza para número de tubérculos (180 dds)	48
Tabla 11. Prueba de Tukey al 5% para Número de tubérculos Categoría 1 (180 dds)	48
Tabla 12. Análisis de varianza para Peso promedio de tubérculo por categorías (180 dds)	49
Tabla 13. Análisis de varianza para el rendimiento por categorías (180dds)	50
Tabla 14. Prueba de Tukey al 5% para el rendimiento Categoría 1 y total (180dds) ..	50
Tabla 15. Análisis costo/beneficio	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tubérculo de Papa Variedad Súper Chola	29
--	----

Figura 2. Resid HC	33
Figura 3. Ubicación del experimento	38
Figura 4. Distribución del ensayo	40
Figura 5. Parcela neta	40

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas.....	64
Anexo 2. Análisis de suelo del sitio del experimento	66
Anexo 3. Script para realizar el análisis estadístico en R Studio de un DBCA	67

RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de la aplicación del hongo micorrízico arbuscular (*Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*) y diferentes niveles de fertilización edáfica en el comportamiento agronómico, rendimiento y rentabilidad de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Súper Chola, en el Centro Experimental San Francisco, cantón Huaca, provincia del Carchi. Se empleó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) conformado por 7 tratamientos y 4 repeticiones. Los resultados determinaron que el tratamiento T1 (100% fertilización + Micorriza) maximizó el desarrollo vegetativo y la productividad, alcanzando una altura de planta de 88,45 cm y un rendimiento total récord de 42,50 t/ha. Asimismo, se validó la eficiencia de la bio-sustitución: el tratamiento T2 (75% fertilización + Micorriza) logró un rendimiento de 37,42 t/ha, igualando estadísticamente al testigo químico convencional (42,21 t/ha), lo que demuestra que la simbiosis micorrízica permite reducir la carga química en un 25% sin mermas productivas y potenciando el calibre de Categoría 1. Económicamente, el tratamiento T1 generó la mayor utilidad neta (\$9.123,33 USD/ha) y relación Beneficio/Costo (1,73), superando al manejo tradicional del agricultor. Se concluye que la implementación de biotecnología micorrízica constituye una alternativa técnica y financiera viable para optimizar la producción de papa en los suelos Andisoles del norte del Ecuador.

Palabras Claves: *Solanum tuberosum*, *Glomus iranicum*, micorrizas, fertilización edáfica, rendimiento, rentabilidad.

ABSTRACT

The present research evaluated the effect of the application of the arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*) and different levels of edaphic fertilization on the agronomic behavior, yield, and profitability of the potato (*Solanum tuberosum* L.) variety Superchola, at the San Francisco Experimental Center, Huaca canton, Carchi province. A Randomized Complete Block Design (RCBD) was used, consisting of 7 treatments and 4 replications. The results determined that the T1 treatment (100% fertilization + Mycorrhiza) maximized vegetative development and productivity, reaching a plant height of 88.45 cm and a record total yield of 42.50 t/ha. Likewise, the efficiency of bio-substitution was validated: the T2 treatment (75% fertilization + Mycorrhiza) achieved a yield of 37.42 t/ha, statistically equaling the conventional chemical control (42.21 t/ha), which demonstrates that mycorrhizal symbiosis allows reducing the chemical load by 25% without productive losses and boosting Category 1 caliber. Economically, the T1 treatment generated the highest net profit (\$9,123.33 USD/ha) and Benefit/Cost ratio (1.73), surpassing the traditional farmer's management. It is concluded that the implementation of mycorrhizal biotechnology constitutes a viable technical and financial alternative to optimize potato production in the Andisols soils of northern Ecuador.

Keywords: *Solanum tuberosum*, *Glomus iranicum*, mycorrhizae, edaphic fertilization, yield, profitability.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) representa uno de los pilares fundamentales de la seguridad alimentaria global y el eje dinamizador de la economía rural en la Sierra ecuatoriana. En la provincia del Carchi, este rubro adquiere una relevancia estratégica al aportar cerca del 40% de la producción nacional, siendo la variedad Súper Chola el referente de calidad y mercado. No obstante, la sostenibilidad de este sistema productivo se encuentra bajo una presión sin precedentes debido a la volatilidad en el costo de los insumos sintéticos, los cuales han visto sus precios duplicarse en la última década, comprometiendo la estabilidad financiera de la agricultura familiar campesina (Reyes & Torres, 2023).

Esta dependencia de fertilizantes químicos ha acelerado la degradación de los Andisoles en el norte del Ecuador. El manejo convencional ha provocado un descenso del pH (< 5.0) y una alteración en la microbiota natural del suelo, afectando la salud de los ecosistemas de páramo cultivado (López & Vaca, 2024). Uno de los desafíos más críticos en estos suelos de origen volcánico es la fijación masiva de fósforo, donde el nutriente queda inmovilizado en complejos insolubles de aluminio y hierro, volviéndose inaccesible para el sistema radicular de la planta (Ramírez, 2025). Esta ineficiencia nutricional obliga a los productores a aplicar dosis excedentes de fertilizantes que no son asimilados, incrementando la carga química y los costos de producción.

La fisiología de los suelos andinos demanda una transición hacia modelos que optimicen la interacción entre la planta y la microbiota rizosférica (Burbano, 2023). Dado que la papa posee un sistema radicular relativamente superficial, la eficiencia en la absorción de nutrientes es el factor determinante para alcanzar el potencial genético de la variedad (García & Martínez, 2024). En este contexto, el uso de bioestimulantes de última generación está transformando la agricultura interandina, posicionándose como una herramienta clave para mejorar la nutrición vegetal de manera sostenible (Navas & Herrera, 2023).

Dentro de estas innovaciones biotecnológicas, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), específicamente la cepa *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*, ofrecen una solución disruptiva. Este microorganismo establece una simbiosis que extiende el

alcance radicular a través de hifas fúngicas, permitiendo la exploración de microporos y la solubilización de nutrientes bloqueados. Además, se ha demostrado que esta cepa mejora la resiliencia del cultivo ante condiciones de estrés abiótico y salinidad química, factores comunes en zonas de agricultura intensiva (Fernández & Ruiz, 2024). La implementación de estas estrategias no solo garantiza la productividad, sino que reduce la huella de carbono al disminuir la necesidad de sales químicas sintéticas (Vargas-Payares et al., 2023).

La presente investigación, realizada en el Centro Experimental San Francisco de la UPEC, busca validar protocolos de fertilización integrada que combinen la nutrición mineral con la inoculación micorrízica. El estudio se fundamenta en la necesidad de generar evidencia local que permita reducir la carga química sin sacrificar el rendimiento comercial, proporcionando una base científica para la adopción de bioinsumos de alta eficiencia en el Carchi (Andrade & Chugá, 2025). Con ello, se pretende ofrecer al productor una alternativa técnica y económicamente viable que asegure la competitividad del sector y la preservación del recurso suelo para las futuras generaciones.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* ssp. *andigena*), con predominancia de la variedad Súper Chola, constituye el eje dinamizador de la economía rural en la provincia del Carchi, zona que aporta cerca del 40% de la producción nacional (INEC, 2024). Sin embargo, este sistema productivo enfrenta actualmente una crisis de sostenibilidad agudizada por un modelo de "agricultura de insumos" intensiva. Los productores locales, en su afán de asegurar rendimientos comerciales, han adoptado esquemas de fertilización química desmedida, aplicando dosis de nitrógeno, fósforo y potasio que superan significativamente los requerimientos fisiológicos del cultivo.

Esta práctica de sobrefertilización ha provocado una severa degradación física y química de los Andisoles (suelos negros de origen volcánico) predominantes en el cantón Huaca. La acidificación progresiva ($\text{pH} < 5.0$) y el desequilibrio en el complejo de cambio han exacerbado un fenómeno crítico en estos suelos: la fijación de fósforo. Debido a la presencia de alófanas y altos contenidos de aluminio y hierro, gran parte del fertilizante fosfatado aplicado se inmoviliza químicamente, quedando indisponible para las raíces de la planta. Esto genera un círculo vicioso de ineficiencia donde el agricultor se ve obligado a incrementar las dosis campaña tras campaña para mantener la productividad, elevando los costos de producción a niveles que comprometen la rentabilidad económica (Paspuel & Rosero, 2022; MAG, 2025).

Paralelamente, el sector agrícola del Carchi enfrenta un vacío tecnológico respecto a la validación de alternativas biológicas que optimicen la nutrición mineral. Aunque se reconoce el potencial de los microorganismos promotores del crecimiento, existe una desconfianza generalizada sobre su efectividad en climas fríos y suelos de alta retención. Específicamente, el uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) como *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* (Resid HC) se perfila como una solución estratégica, ya que esta cepa ha demostrado capacidad para solubilizar nutrientes y extender el sistema radicular incluso bajo condiciones de alta salinidad química.

No obstante, la falta de investigaciones locales realizadas en entornos específicos como el Centro Experimental San Francisco – UPEC, que determinen científicamente si la aplicación de micorrizas permite reducir las dosis de fertilización edáfica sin sacrificar el rendimiento comercial, impide que el productor transite hacia un modelo más eficiente. Sin datos que validen la sinergia entre la fertilización mineral y la inoculación biológica, el sector continuará dependiendo de un manejo convencional de altos insumos que degrada el recurso suelo y vulnera la economía del pequeño y mediano productor de papa (Andrade & Chugá, 2025).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La fertilización química indiscriminada en el cultivo de papa Superchola en el cantón Huaca acelera la degradación de los suelos Andisoles y eleva significativamente los costos operativos, reduciendo la rentabilidad del productor. Asimismo, la nula adopción de bioestimulantes basados en micorrizas como *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* limita la eficiencia nutricional y el rendimiento comercial, afectando la competitividad y sostenibilidad del sector frente a un mercado que demanda prácticas agrícolas más eficientes.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La producción de papa en la provincia del Carchi enfrenta un "techo productivo" estancado por la degradación físico-química de los suelos Andisoles. Según Paspuel y Rosero (2022), el uso continuado de fertilizantes de síntesis química ha provocado un descenso del pH y un bloqueo masivo de fósforo, obligando a los agricultores a aplicar dosis de fertilización que exceden hasta en un 40% los requerimientos reales del cultivo. Esta investigación se justifica en la necesidad urgente de validar biotecnologías de nutrición avanzada como la inoculación con *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* (Resid HC). A diferencia de la fertilización convencional que aporta nutrientes de manera externa, esta tecnología propone la eficiencia fisiológica: el uso de hifas fúngicas para explorar microporos del suelo, solubilizar el fósforo retenido y optimizar la absorción radicular, rompiendo el ciclo de ineficiencia de los insumos sintéticos.

Desde una perspectiva científica, existe una brecha de conocimiento local sobre la sinergia entre la Fertilización Edáfica y la Inoculación Micorrízica en la variedad Superchola. Mientras la creencia empírica sugiere que a mayor cantidad de fertilizante mayor es el rendimiento, esta tesis es fundamental porque provee datos

exactos para demostrar técnicamente que es posible reducir la carga química sin sacrificar el calibre comercial. Al evaluar diferentes dosis de fertilización en interacción con el bioinsumo, se genera evidencia inédita en el Centro Experimental San Francisco – UPEC sobre la capacidad de este hongo para mantener la productividad incluso bajo regímenes de fertilización reducida.

En el ámbito socioeconómico, la rentabilidad del productor carchense se ve amenazada por la volatilidad de los precios de insumos importados como el DAP y la Urea. Esta investigación es socialmente pertinente porque busca validar una alternativa tecnológica que ofrece una rentabilidad competitiva y menor dependencia de agroquímicos externos. Al demostrar que la sustitución parcial de la fertilización química por biotecnología micorrízica permite obtener una cosecha con mayor porcentaje de Categoría 1 (papa gruesa), se entrega al agricultor una herramienta para blindar su economía, maximizando el retorno de inversión y garantizando la sostenibilidad de la unidad productiva familiar frente a las crisis de precios de fertilizantes.

Finalmente, la investigación responde a una necesidad de mitigación ambiental. El modelo convencional extractivista deteriora la estructura del suelo y contamina fuentes hídricas por lixiviación de nitratos (Ministerio del Ambiente, 2021). La implementación de *Glomus iranicum* se justifica como una estrategia de agricultura regenerativa, ya que promueve la salud del suelo a través de la secreción de glomalina y el equilibrio biológico de la rizosfera. Validar esta tecnología contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12: Producción y Consumo Responsables), ofreciendo un modelo que preserva el recurso suelo del Carchi para las futuras generaciones, garantizando la seguridad alimentaria nacional sin comprometer el patrimonio natural.

1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola con la aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro Experimental San Francisco – UPEC

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar el comportamiento agronómico (altura de planta, número de tallos y diámetro de tallo) de la papa variedad Súper Chola bajo la aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en interacción con diferentes niveles de fertilización.
- Comparar el rendimiento comercial por categorías y la productividad total del cultivo entre los tratamientos inoculados y el manejo convencional, para establecer la eficiencia de la simbiosis micorrízica en la reducción de insumos químicos.
- Analizar la viabilidad económica de los tratamientos mediante la relación Beneficio/Costo

1.4.3. Preguntas de Investigación

- ¿De qué manera influye la simbiosis micorrízica, bajo distintos niveles de fertilización mineral, en las variables de crecimiento vegetativo (altura de planta, diámetro de tallo y número de tallos) del cultivo de papa Súper Chola?
- ¿Existe una diferencia significativa en el rendimiento comercial por categorías, especialmente en el calibre de Categoría 1, al comparar el uso de micorrizas frente al manejo químico convencional del agricultor?
- ¿Es técnicamente posible reducir la carga de fertilizantes químicos mediante el uso de *Glomus iranicum* var *tenuihypharum* sin comprometer la productividad total del cultivo?
- ¿Cuál es el tratamiento que maximiza la utilidad neta y presenta la mejor relación Beneficio/Costo para el productor de papa en el cantón Huaca?

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Chamorro et al. (2021), en su investigación publicada en la revista *Cultivos Tropicales* titulada "Reducción de la fertilización fosfórica con el uso de biofertilizantes en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Superchola en suelos Andisoles del Carchi", emplearon un diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial para evaluar la interacción entre niveles de fósforo (100%, 75%, 50% y 25%) y la inoculación con micorrizas arbusculares. Los resultados indicaron que la reducción del 25% de la fertilización fosfórica combinada con el biofertilizante no afectó estadísticamente el rendimiento, alcanzando una producción de 25,32 t/ha, valor que superó numéricamente al testigo de fertilización convencional exclusiva que obtuvo 20,00 t/ha. El análisis económico demostró que este manejo integrado incrementó la rentabilidad en un 18% debido al menor costo de los insumos químicos, concluyendo que la simbiosis micorrízica compensa eficientemente el déficit de fósforo en suelos volcánicos de alta retención.

Luna (2022), en su estudio desarrollado en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, titulado "Evaluación de dosis de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en la productividad y calidad de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola", utilizó un diseño de Bloques Completos al Azar con cuatro repeticiones para comparar el efecto de diferentes concentraciones de inóculo micorrízico sobre el calibre de los tubérculos. Los resultados mostraron que la inoculación influyó significativamente en la calidad comercial, donde el tratamiento con la dosis estándar del hongo alcanzó el mayor rendimiento de "papa gruesa" (Categoría 1) con un promedio de 20,00 t/ha, superando al testigo absoluto y a los tratamientos sin inoculación. La autora concluyó que, aunque el rendimiento total estuvo condicionado por factores climáticos, el uso de *Glomus iranicum* mejoró la uniformidad y el tamaño del tubérculo, variables determinantes para el precio final en el mercado.

Benavides (2025), en su Trabajo de Integración Curricular realizado en la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, titulado "Evaluación del rendimiento del cultivo de papa variedad Puca Shungo con la aplicación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro Experimental San Francisco", empleó un diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial. Evaluó la interacción de *Glomus iranicum* y bacterias fijadoras de nitrógeno con dosis del 100%, 75% y 0% de fertilización química. Los resultados evidenciaron que el tratamiento de fertilización al 100% más la inoculación biológica obtuvo el mayor rendimiento con 18,24 t/ha y un promedio de 21 tubérculos por planta. Sin embargo, se destacó que el tratamiento con reducción al 75% de fertilizante más micorrizas mantuvo una productividad estadísticamente similar al manejo convencional completo, logrando una relación costo-beneficio favorable de 1,45, lo que valida la viabilidad técnica de disminuir la carga química sin sacrificar la cosecha.

Contreras-Pino et al. (2025), en su investigación reciente titulada "Effects of *Glomus iranicum* on Potato Growth and Nutrient Absorption under Greenhouse Conditions", desarrollaron un ensayo bajo condiciones controladas utilizando un Diseño Completamente al Azar (DCA) para determinar la dosis óptima del hongo y su impacto en la fisiología de la planta. Los resultados cuantitativos revelaron que la inoculación incrementó el peso seco de los tubérculos en un 57% y la biomasa foliar en un 90% en comparación con las plantas no tratadas. Asimismo, el análisis de tejidos mostró una concentración significativamente mayor de Fósforo y Calcio en las hojas de las plantas micorrizadas. Los autores concluyeron que el mecanismo principal de acción de *G. iranicum* es la extensión del sistema radicular extraradical, lo que permite a la planta explorar microporos del suelo inaccesibles para las raíces, optimizando la absorción de agua y nutrientes inmóviles.

Mora (2018), en su tesis presentada en la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, titulada "Alternativas de bio-fertilización sobre indicadores productivos de *Solanum tuberosum* en Carchi", evaluó mediante un diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) la respuesta de la variedad Superchola a la complementación nutricional con bioinsumos comerciales. Los hallazgos de esta investigación establecieron un referente productivo para la zona de Huaca, reportando un rendimiento récord de 45,16 t/ha en el tratamiento que combinó la fertilización mineral completa con biofertilizantes. Este estudio concluyó que las condiciones edafoclimáticas del Carchi,

sumadas a un manejo integrado de la nutrición, permiten expresar el máximo potencial genético de la variedad, recomendando la inclusión de bioestimulantes en los planes de manejo convencional para maximizar la rentabilidad del productor.

Tobar (2024), en su investigación titulada "Eficiencia agronómica de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en el cultivo de nabo (*Brassica rapa* subsp. *rapa*) en la UPEC", utilizó un diseño de Bloques Completos al Azar para medir el efecto del hongo en un cultivo de ciclo corto en suelos Andisoles. Aunque realizado en una especie diferente, este antecedente es crucial para la zona pues demostró que la cepa específica *G. iranicum* generó incrementos significativos en la biomasa fresca y seca, con una diferencia del 22% superior al testigo químico. El estudio validó la adaptabilidad del microorganismo a las condiciones de temperatura y suelo de Huaca, sugiriendo que su mecanismo de acción es generalista y efectivo para potenciar el rendimiento en cultivos de alta demanda nutricional establecidos en la región.

Condori y Mamani (2020), en su estudio realizado en el Altiplano peruano titulado "Efecto de la inoculación con *Glomus intraradices* en el rendimiento de dos variedades de papa nativa bajo condiciones de campo", emplearon un diseño de Bloques Completos al Azar con arreglo factorial. Evaluaron el desempeño del cultivo sin la aplicación de fertilizantes sintéticos, dependiendo exclusivamente de la inoculación micorrízica. Los resultados mostraron que el tratamiento inoculado alcanzó un rendimiento de 14,01 t/ha, superando en un 7,02% al testigo absoluto no inoculado. Si bien los rendimientos fueron bajos por la ausencia de fertilización química, la investigación concluyó que las micorrizas son una alternativa sostenible para sistemas de agricultura familiar o de bajos insumos, permitiendo mantener niveles aceptables de producción y seguridad alimentaria a bajo costo.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1 Origen del cultivo de papa

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es una especie herbácea tuberosa de la familia Solanaceae. Su centro de origen y domesticación se localiza en la región andina, específicamente en las inmediaciones del lago Titicaca, abarcando territorios de Perú y Bolivia, hace aproximadamente 8,000 años. Actualmente, constituye el tercer cultivo alimenticio más consumido por el ser humano a nivel global, después del arroz y el trigo, desempeñando un rol estratégico en la seguridad alimentaria mundial (FAO, 2022). En el contexto ecuatoriano, la producción se concentra en la región

Sierra; la provincia del Carchi destaca como el principal motor productivo nacional, aportando aproximadamente el 40% de la oferta debido a la excepcional fertilidad de sus suelos de origen volcánico (Andisoles) y su clima de altura (MAG, 2023).

2.2.2 Taxonomía del cultivo

De acuerdo con el sistema de clasificación botánica vigente y la base de datos del USDA (2023), la posición sistemática de la papa se detalla a continuación:

Tabla 1. Taxonomía del cultivo de papa

Categoría	Nombre
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta (Angiospermas)
Clase	Magnoliopsida (Dicofiledóneas)
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Solanum</i>
Especie	<i>Solanum tuberosum</i> L.
Subespecie	<i>andígena</i> (Variedad Súper Chola)

Fuente: (USDA, 2023)

2.2.3 Morfología

La papa es una planta herbácea perenne por sus tubérculos, aunque se cultiva como anual. Su estructura morfológica es compleja, comprendiendo órganos aéreos y subterráneos especializados (INIAP, 2021; Pumisacho & Sherwood, 2022).

- Sistema Radicular: El sistema de raíces es de tipo fasciculado o fibroso, compuesto por raíces adventicias delgadas y altamente ramificadas. Estas se originan inicialmente de los nudos de los brotes del tubérculo-semilla y, posteriormente, de los nudos de los tallos subterráneos. Poseen un crecimiento rápido y se concentran principalmente en los primeros 40 a 60 cm de profundidad del suelo. Su función biológica es el anclaje de la planta y la absorción eficiente de agua y nutrientes, siendo un sistema altamente sensible a la compactación y al encharcamiento (INIAP, 2021).
- Tallos: La planta presenta una diferenciación clara entre tallos aéreos y subterráneos:
 - Tallos Aéreos: Son herbáceos, suculentos y de sección angular (triangular o cuadrangular), a menudo provistos de alas membranosas en las aristas. En la variedad Súper Chola, los tallos son vigorosos, de hábito erecto a semi-erecto y presentan una coloración verde con

- pigmentaciones púrpuras o moradas intensas, características de este material genético.
- Tallos Subterráneos (Estolones): Son brotes laterales que crecen horizontalmente bajo la superficie del suelo a partir de los nudos basales del tallo principal. Poseen entrenudos largos y ápices que, bajo condiciones de inducción (fotoperiodo corto y bajas temperaturas), se engrosan para dar origen a los nuevos tubérculos.
 - Tubérculos: Constituyen el órgano de reserva y el interés económico del cultivo. Botánicamente, el tubérculo es un tallo subterráneo modificado, acortado y engrosado, especializado en el almacenamiento de almidón.
 - Anatomía: Externamente presenta una piel o peridermis (de color rosado en la Súper Chola) y una pulpa o parénquima de reserva (de color amarillo).
 - Yemas (Ojos): Son depresiones en la superficie que albergan yemas axilares en latencia. Los "ojos" están distribuidos en espiral y son más numerosos en el extremo apical del tubérculo.
 - Hojas: Son el principal motor fotosintético. Presentan una morfología compuesta, alterna e imparipinnada.
 - Estructura: Formadas por un raquis central donde se insertan folíolos primarios (3 a 4 pares), alternados con folíolos secundarios de menor tamaño, finalizando en un folíolo terminal único.
 - Vigor en Súper Chola: Las hojas son de color verde oscuro, con una superficie pilosa y ligeramente rugosa. Esta pilosidad actúa como una barrera física frente a la pérdida de humedad y el ataque de ciertos insectos.
 - Inflorescencia y Flores: Las flores se agrupan en cimas terminales protegidas por brácteas. Son flores hermafroditas y pentámeras. La flor de la Súper Chola es distintiva por su color violeta o lila intenso con puntas blancas acuminadas. En el centro destaca un cono de anteras amarillo brillante que rodea al pistilo.
 - Fruto y Semilla
 - Fruto: Es una baya globosa de color verde, de 1 a 3 cm de diámetro, similar a un tomate pequeño. Al madurar se torna amarillenta o café. Contiene alcaloides y no es comestible.

- Semilla Botánica: En el interior del fruto se encuentran numerosas semillas verdaderas (sexuales), pequeñas, aplanadas y reniformes. Estas semillas son el resultado de la polinización y se utilizan principalmente en programas de mejoramiento genético, no en la producción comercial de consumo.

2.2.4 Requerimiento edafoclimático

El éxito productivo del cultivo de papa, especialmente de la variedad Súper Chola, está intrínsecamente ligado a la interacción Genotipo-Ambiente. Las condiciones del norte ecuatoriano, particularmente en la provincia del Carchi, ofrecen un escenario óptimo donde los suelos volcánicos y el clima de altura actúan como factores determinantes para la expresión del potencial de rendimiento y la calidad comercial del tubérculo (INIAP, 2021).

Los suelos del cantón Huaca se clasifican predominantemente como Andisoles, caracterizados por su origen volcánico y una mineralogía dominada por materiales de corto rango como la alofana. De acuerdo con Burbano (2023), la fisiología de estos suelos es compleja debido a su alta porosidad y capacidad de retención de humedad, pero presentan una limitante química severa: la formación de complejos organominerales que inmovilizan nutrientes esenciales. Esta dinámica edáfica influye directamente en la disponibilidad de la solución del suelo, donde el equilibrio entre la fase sólida y líquida determina la capacidad de la planta para acceder a los minerales necesarios para su desarrollo.

2.2.4.1 Requerimientos Edáficos (Suelo)

El sistema radicular de la papa es relativamente superficial y delicado, por lo que demanda condiciones físicas y químicas específicas en el suelo para su correcto anclaje y nutrición:

- Textura y estructura: La papa requiere suelos de textura media a ligera, preferiblemente franco-arenosos, franco-limosos o francos (Andisoles), con una estructura suelta, porosa y friable. Los suelos "negros andinos" del Carchi son ideales por su alta porosidad, que facilita el crecimiento de estolones y permite la expansión volumétrica de los tubérculos sin resistencia mecánica. Según Pumisacho y Sherwood (2022), los suelos pesados o compactados restringen la aireación y el drenaje, provocando deformaciones en el tubérculo y aumentando la susceptibilidad a enfermedades radiculares.

- **Propiedades Químicas y pH:** El rango óptimo de pH oscila entre 5.0 y 6.5. Aunque el cultivo tolera cierta acidez, Espinosa y Molina (2019) advierten que en suelos con pH inferior a 5.0, comunes en zonas altas por lixiviación, se activa la toxicidad por Aluminio (Al^{3+}). Este elemento inhibe la elongación radicular y bloquea la disponibilidad del Fósforo (P), formando fosfatos de aluminio insolubles.
- **Materia Orgánica (MO):** Al ser suelos de origen volcánico, los Andisoles del Carchi poseen contenidos de MO que pueden superar el 8%. Esta abundancia es crítica para la retención hídrica, la regulación térmica del suelo y el suministro gradual de nitrógeno orgánico.
- **Profundidad y Drenaje:** Se requiere una profundidad efectiva arable de al menos 40 a 60 cm. El cultivo es altamente sensible a la hipoxia; el encharcamiento por más de 24 horas puede causar la muerte de lenticelas y facilitar ataques bacterianos (*Pectobacterium* spp.) que comprometen la sanidad de la cosecha (INIAP, 2021).

2.2.4.2 Requerimientos Climáticos

La papa es una especie termoperiódica y fotoperiódica, cuya eficiencia fotosintética y tasa de tuberización dependen estrictamente de las variables atmosféricas:

- **Temperatura:** Es el factor más influyente en la fenología. Para la variedad Súper Chola, el rango óptimo es de 10°C a 18°C.
 - **Efecto térmico:** La temperatura ideal para el desarrollo foliar es de 16°C a 22°C durante el día. Sin embargo, para la tuberización, se requieren temperaturas nocturnas bajas (10°C a 14°C), las cuales reducen la respiración celular y permiten que la mayor parte de los fotoasimilados (azúcares) se trasladen desde las hojas hacia los tubérculos (CIP, 2021). Temperaturas medias superiores a 20°C pueden inhibir este proceso, favoreciendo únicamente el crecimiento vegetativo.
- **Altitud:** La subespecie *andígena* se adapta con éxito a las zonas altoandinas. En el Carchi, la Súper Chola se cultiva preferentemente entre los 2.600 y 3.400 m.s.n.m. A estas altitudes, la radiación ultravioleta es más intensa, lo que estimula la síntesis de almidón y mejora la gravedad específica del tubérculo.

- Precipitación y Humedad: El cultivo demanda entre 400 y 800 mm de lluvia distribuidos a lo largo del ciclo. Las etapas críticas donde el estrés hídrico puede causar pérdidas irreversibles en el rendimiento son la emergencia, la estolonización y el llenado de tubérculos. La humedad relativa óptima debe mantenerse entre el 70% y 80%; niveles superiores favorecen el desarrollo de la "lancha" o tizón tardío (*Phytophthora infestans*).
- Luz y Fotoperiodo: En el Ecuador, la papa se desarrolla bajo condiciones de día corto (aproximadamente 12 horas de luz). Esta estabilidad lumínica es fundamental para inducir la tuberización temprana. No obstante, la intensidad lumínica (radiación solar global) es la que define la tasa de fotosíntesis neta; días nublados persistentes en zonas altas pueden reducir el rendimiento final por una menor captura de energía (Pumisacho & Sherwood, 2022).

2.2.5 Material genético y variedades

En el Ecuador, la diversidad genética del cultivo de papa se gestiona a través de una clasificación comercial fundamentada en dos ejes: su origen evolutivo (variedades nativas o mejoradas) y su aptitud industrial o culinaria (consumo en fresco o procesamiento). Según el Catálogo de variedades de papa del Ecuador (INIAP, 2023), el germoplasma cultivado en la región interandina pertenece predominantemente a la subespecie *andigena*.

Las variedades nativas, resultantes de procesos milenarios de selección ancestral, destacan por sus formas exóticas y altos contenidos de antioxidantes; sin embargo, el mercado masivo está liderado por variedades mejoradas desarrolladas por el Programa Nacional de Raíces y Tubérculos del INIAP. Estas variedades han sido seleccionadas bajo criterios de resistencia horizontal a enfermedades limitantes y altos potenciales de rendimiento que pueden duplicar a las variedades tradicionales. Cultivares como INIAP-Fripapa, INIAP-Catalina y recientemente INIAP-SuperFri (liberada en 2022), han ganado terreno por su precocidad y mayor resistencia al tizón tardío (*Phytophthora infestans*), aunque en la zona norte (Carchi), la variedad Súper Chola continúa siendo el pilar fundamental de la economía agrícola y el referente indiscutible de calidad (Monteros et al., 2021; MAG, 2023).

2.2.5.1 Variedad Súper Chola

La variedad Súper Chola es un clon mejorado generado originalmente por el fitomejorador Germán Bastidas y liberado oficialmente por el INIAP en 1984. Su pedigrí

es el resultado de cruzamientos complejos que involucran a la variedad Curipamba negra x *Solanum demissum*, cruzados a su vez con un clon resistente de pulpa amarilla y una chola seleccionada (CIP, 2017). Esta composición genética le confiere una rusticidad excepcional, permitiéndole ocupar más del 60% de la superficie cultivada en la provincia del Carchi, la cual aporta el 46% de la producción nacional (MAG, 2023).

Se caracteriza por una amplia plasticidad ambiental, adaptándose desde los 2.800 hasta los 3.600 m.s.n.m. Presenta una estabilidad de rendimiento que, bajo condiciones experimentales y manejo tecnificado, puede alcanzar las 45 t/ha, aunque su promedio comercial ronda las 30 t/ha. Fisiológicamente, destaca por su alto contenido de materia seca (~24%) y una gravedad específica de 1.098, lo que le otorga una aptitud superior para el procesamiento industrial en forma de hojuelas y bastones, además de su excelente palatabilidad en el consumo doméstico.

Características agronómicas

- Adaptación: Óptima entre 2.800 y 3.400 m.s.n.m. (Zonas norte y centro).
- Hábito de crecimiento: Erecto a semi-erecto, con tallos vigorosos con pigmentación púrpura y alas rectas.
- Follaje: Frondoso y de desarrollo rápido, lo que garantiza una cobertura temprana del suelo y reducción de la competencia con malezas.
- Materia Seca: 22% a 24%, garantizando una textura harinosa ideal para la gastronomía andina.
- Periodo de dormancia: Aproximadamente 80 a 90 días, lo que permite un almacenamiento seguro sin brotación prematura.
- Ciclo de vida: 160 a 180 días (Semitardía), dependiendo de la altitud y temperatura media.

Características morfológicas

- Hojas: Hojas abiertas de color verde intenso; presentan una estructura diseccionada con tres pares de folíolos primarios, tres pares de folíolos secundarios y hasta cinco pares de folíolos terciarios.
- Flores: Floración profusa con corola de forma rotada; el color predominante es lila o violeta intenso con puntas blancas que forman una estrella característica.

- Tubérculo: Forma elíptica a ovalada, piel rosada intensa y lisa, con coloración crema distribuida alrededor de los ojos (superficiales a semiprofundos) y pulpa de color amarillo intenso.
- Resistencia Fitosanitaria: Es considerada susceptible a moderadamente resistente al tizón tardío (*Phytophthora infestans*) según la presión del patógeno, moderadamente resistente a roya (*Puccinia pittieriana*) y presenta una notable tolerancia al nematodo del quiste de la papa (*Globodera pallida*) (INIAP, 2023; CIP, 2024).

Usos

- Consumo fresco: Sopas (locros), purés y consumo doméstico general.
- Industria: Bastones (papas fritas) y chips, debido a su bajo contenido de azúcares reductores y alta gravedad específica (INIAP, 2021).



Figura 1. Tubérculo de Papa Variedad Súper Chola
Fuente: (INIAP, 2021)

2.2.6 Nutrición vegetal y estrategias de fertilización

La papa es considerada una de las especies más exigentes en términos de fertilidad debido a su sistema radicular fasciculado y superficial, lo que limita su volumen de exploración. Según García y Martínez (2024), la eficiencia nutricional en *Solanum tuberosum* no depende únicamente de la cantidad de fertilizante aplicado, sino de la capacidad fisiológica de la planta para absorber y traslocar dichos elementos hacia los tubérculos en periodos críticos. Una nutrición deficiente o un desequilibrio en la relación N-P-K no solo reduce el rendimiento, sino que compromete la calidad postcosecha y el contenido de materia seca, factores determinantes para la competitividad en el mercado nacional.

La papa es un cultivo de metabolismo acelerado y ciclo corto que presenta una de las mayores tasas de absorción de nutrientes por unidad de tiempo entre los cultivos anuales. Esta "voracidad nutricional" la clasifica como una especie altamente exigente en fertilidad edáfica. De acuerdo con Bertsch (2009) y estudios actualizados del INIAP (2021), para alcanzar rendimientos competitivos de 40 t/ha, el cultivo requiere extraer del perfil del suelo cantidades masivas de macronutrientes.

La remoción estimada para una cosecha de alta productividad se detalla en la siguiente relación de extracción:

- Nitrógeno (N): 175 a 200 kg/ha
- Fósforo (P₂O₅): 80 a 100 kg/ha
- Potasio (K₂O): 300 a 350 kg/ha

En la provincia del Carchi, el diseño de estrategias de fertilización debe considerar no solo la demanda del cultivo, sino la cinética de nutrientes en los Andisoles. Estos suelos, derivados de cenizas volcánicas, poseen una alta capacidad de retención de humedad pero presentan el desafío de la fijación de aniones fosfato, lo que obliga al técnico a buscar alternativas que mejoren la eficiencia de uso de los fertilizantes (NUE, por sus siglas en inglés).

2.2.6.1 Requerimientos Nutricionales del Cultivo

La nutrición equilibrada es el factor determinante para la expresión del potencial genético de la variedad Súper Chola. El sistema radicular de la papa, al ser fasciculado y concentrarse en los primeros 30 cm de profundidad, limita su volumen de exploración, haciendo que la disponibilidad inmediata de nutrientes sea crítica.

- Nitrógeno (N): El motor del crecimiento Es el componente fundamental de proteínas, ácidos nucleicos y la molécula de clorofila. Su función biológica primaria es regular el Índice de Área Foliar (IAF) y la tasa fotosintética.

Deficiencia: Provoca una senescencia prematura, clorosis en hojas basales y una reducción drástica en el número de tubérculos.

Exceso: Según INIAP (2020), una sobrefertilización nitrogenada en las condiciones del Carchi promueve un crecimiento vegetativo exuberante o "viciamiento", retrasando la inducción de la tuberización, reduciendo la gravedad específica (contenido de almidón) y aumentando la susceptibilidad a la "Lancha" (*Phytophthora infestans*) por la formación de tejidos suculentos y delgados.

- Fósforo (P): El elemento de la energía y el enraizamiento. Actúa en la transferencia de energía a nivel celular (ATP) y es estructural en los fosfolípidos de las membranas. Es vital para la división celular en los puntos de crecimiento (meristemos).

Dinámica en el Carchi: En los suelos negros del norte ecuatoriano, el fósforo es el nutriente más limitante debido a su interacción con minerales de corto rango como la alofana y óxidos de hierro y aluminio. Bajo pH ácidos, el fósforo se precipita como fosfatos de aluminio, quedando indisponible para la planta.

Importancia: Una adecuada disponibilidad inicial garantiza un sistema radicular vigoroso y una estolonización uniforme. Es aquí donde la simbiosis con Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) cobra relevancia, al incrementar la superficie de absorción y solubilizar fracciones de fósforo fijado (Espinosa & Molina, 2019).

- Potasio (K): El regulador de calidad y traslocación. Es el nutriente de mayor extracción cuantitativa por la papa. No forma parte de estructuras orgánicas, sino que actúa como un activador enzimático y regulador osmótico.

Función "Fuente-Sumidero": El potasio es el responsable de la carga y descarga de fotosintatos en el floema. Regula la apertura y cierre de estomas, permitiendo una fotosíntesis eficiente incluso bajo estrés hídrico moderado.

Efecto en el tubérculo: Una nutrición potásica óptima, según Marschner (2012), incrementa la síntesis de almidón, mejora la resistencia al "golpe negro" (pardeamiento enzimático) y confiere mayor tolerancia a las heladas, fenómeno climático recurrente en las zonas altas del Carchi.

- Nutrientes Secundarios y Micronutrientes: Aunque se requieren en menores cantidades, elementos como el Magnesio (Mg^{2+}) para la fotosíntesis, el Calcio (Ca^{2+}) para la integridad de las paredes celulares del tubérculo, y el Zinc (Zn^{2+}) para la síntesis de auxinas, son indispensables para evitar desórdenes fisiológicos y asegurar la sanidad post-cosecha (Yumisaca et al., 2022).

2.2.7 Bioinsumos

Los bioinsumos se definen como productos de origen biológico formulados a base de microorganismos benéficos (bacterias, hongos), extractos vegetales o compuestos orgánicos bioactivos. Su función principal es estimular procesos fisiológicos naturales

para mejorar la absorción de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y la eficiencia metabólica (Churata, 2019). Según Tobar (2024), el uso de estos insumos en la provincia del Carchi ha ganado relevancia como una estrategia para mitigar la degradación de los Andisoles causada por el uso intensivo de fertilizantes sintéticos.

2.2.7.1 Resid HC: *Glomus iranicum* var. *Tenuihypharum*

El producto biotecnológico evaluado, basado en el hongo micorrízico arbuscular *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*, actúa como un potente catalizador de la absorción de nutrientes. Fernández y Ruiz (2024) explican científicamente que este microorganismo induce una respuesta sistémica en la planta, optimizando el transporte de agua y minerales incluso bajo condiciones de estrés abiótico, como la salinidad química provocada por el exceso de fertilizantes sintéticos. A través de la formación de arbusculos intracelulares, el hongo incrementa la superficie de absorción radicular y secreta enzimas fosfatasas que facilitan la liberación del fósforo retenido en la fracción mineral del suelo, asegurando un suministro constante de nutrientes durante las fases de mayor demanda energética del cultivo. A diferencia de otros HMA genéricos, esta cepa fue aislada y seleccionada por su capacidad de simbiosis bajo condiciones de agricultura intensiva y alta salinidad (Symborg, 2023).

Mecanismo de Acción:

El mecanismo de acción de *Glomus iranicum* se fundamenta en la simbiosis mutualista con las raíces de la planta. Una vez aplicado, el hongo penetra las células corticales formando arbusculos, que son estructuras ramificadas donde ocurre el intercambio de nutrientes: la planta entrega carbono (azúcares) al hongo y este entrega agua y minerales, principalmente fósforo (PO_3^-) (PO_4^-) y micronutrientes.

- **Expansión del Sistema Radicular:** El hongo desarrolla un extenso micelio externo (hifas) que explora un volumen de suelo hasta 100 veces mayor que las raíces por sí solas, accediendo a microporos donde el agua y los nutrientes están retenidos (Contreras-Pino et al., 2025).
- **Balance Hormonal:** La colonización micorrízica modifica los niveles de fitohormonas (auxinas y citoquininas), promoviendo un mayor crecimiento vegetativo y un retraso en la senescencia foliar (Tobar, 2024).
- **Producción de Glomalina:** Este hongo secreta una glicoproteína llamada glomalina, que actúa como un pegamento biológico, mejorando la

agregación de las partículas del suelo y la retención hídrica en los Andisoles del Carchi (Benavides, 2025).

Ventajas Técnicas y Antecedentes Locales:

De acuerdo con investigaciones realizadas en la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (Tobar, 2024; Benavides, 2025), el uso de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* presenta ventajas comparativas únicas:

1. Tolerancia a la Fertilización Química: A diferencia de las micorrizas nativas que se inhiben ante altas dosis de fósforo, esta cepa mantiene su actividad colonizadora incluso en programas de fertilización intensiva, lo que permite su integración en planes de manejo convencional mejorado (Symborg, 2023).
2. Eficiencia en Suelos Volcánicos: En el Carchi, los Andisoles fijan el fósforo con alta energía. Estudios de Chamorro et al. (2021) demuestran que el uso de micorrizas específicas como esta permite reducir hasta un 25% la fertilización mineral sin mermar el rendimiento, gracias a la solubilización biológica de fosfatos.
3. Baja Producción de Esporas en la Raíz: Esta cepa realiza la esporulación fuera de los vasos radiculares, lo que evita el gasto energético excesivo de la planta y permite un flujo de savia más eficiente durante el llenado de los tubérculos (Expocultivos, 2024).



Figura 2. Resid HC
Fuente: (Symborg, 2023)

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1.1. Enfoque

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, fundamentado en la recolección y análisis sistemático de datos numéricos provenientes de variables agronómicas (altura, diámetro y número de tallos) y productivas (rendimiento por categorías). Se utilizó la estadística descriptiva e inferencial para determinar la significancia de los tratamientos evaluados, permitiendo validar la eficacia de la simbiosis micorrízica mediante pruebas de comparación de medias (Tukey al 5%).

3.1.2. Tipo de Investigación

El estudio corresponde a una investigación experimental de campo, de carácter aplicado. Se manipularon deliberadamente las variables independientes dosis de fertilización mineral e inoculación con *Glomus iranicum* var. *Tenuihypharum* en condiciones controladas dentro del Centro Experimental San Francisco. El objetivo fue observar, cuantificar y analizar el efecto de estas interacciones sobre el componente de rendimiento de la papa variedad Súper Chola, estableciendo relaciones de causa-efecto bajo las condiciones edafoclimáticas del cantón Huaca.

3.2. HIPÓTESIS

Hipótesis Alternativa (Ha)

La aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en interacción con diferentes niveles de fertilización edáfica influye significativamente en el comportamiento agronómico, el rendimiento comercial y la rentabilidad económica de la papa variedad Súper Chola.

Hipótesis Nula (H0)

La aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en interacción con diferentes niveles de fertilización edáfica no influye significativamente en el comportamiento agronómico, el rendimiento comercial ni la rentabilidad económica de la papa variedad Súper Chola.

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1. Definición de las variables

Variable independiente

Manejo Nutricional Integrado: Consiste en la combinación de la inoculación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* (Resid HC) con dos metodologías de fertilización edáfica (Convencional y basada en Análisis de Suelos) bajo dos niveles de intensidad (100% y 75%). Esta variable permite evaluar la capacidad de la micorriza para compensar la reducción de fertilizantes químicos, tanto en el manejo empírico como en el técnico.

Variable dependiente

- Comportamiento Agronómico: Variables de crecimiento vegetativo medidas durante el ciclo fenológico: Altura de planta (cm), número de tallos por planta y diámetro de tallo (mm).
- Rendimiento y Calidad: Variables medidas a la cosecha: Rendimiento total (t/ha), clasificación comercial por calibres (Categoría 1, 2, 3 y 4), peso de tubérculos por planta (kg) y número de tubérculos por planta.
- Económica: Eficiencia financiera de los tratamientos calculada mediante la Relación Beneficio/Costo (B/C) y la Utilidad Neta.

3.3.2. Operacionalización de las variables

Tabla 2. Operacionalización de variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
Independiente	Fertilización edáfica	<p>Convencional:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 18-46-0 • 8-20-20 • 0-0-60 <p>100% (150g/planta) 75% (112,5g/planta)</p> <p>Análisis de suelos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 46-0-0 • 0-46-0 • 0-0-60 <p>100% (70g/planta) 75% (52,5g/planta)</p>	<p>Aplicación edáfica fraccionada Convencional:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100%: En el retape se aplicó 18-46-0 (75g/planta) En la alzada de tierra el 8 20-20 (22,5g/planta) y 0-0-60 (52,5g/planta) • 75%: En el retape se aplicó 18-46-0 (56,25g/planta) En la alzada de tierra el 8 20-20 (16,87g/planta) y 0-0-60 (39,37g/planta) <p>Análisis de suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100%: En el retape se aplicó 46-0-0 (10,5g/planta), 0-46-0 (7g/planta), 0-0-60 (14g/planta) En la alzada de tierra 46-0-0 (10,5g/planta), 0-0-60 (28g/planta) • 75%: En el retape se aplicó 46-0-0 (7g/planta), 0-46-0 (5,25g/planta), 0-0-60 (12g/planta) En la alzada de tierra 46-0-0 (8,75g/planta), 0-0-60 (19,5g/planta) 	Balanza
	Inoculación micorrízica	<ul style="list-style-type: none"> • Resid HC 1 kg por cada hectárea de siembra (30 sacos de tubérculo semilla) con peso promedio de tubérculo 75 g 	<p>Antes de sembrar espolvorear en los tubérculos humedecidos con agua desclorada 2% (30 litros de agua para 1500kg de tubérculo semilla) y remover suavemente para que se adhiera a la piel del tubérculo en los brotes</p>	Libreta de campo
Dependiente	Altura de planta	En cm. Se midió a los 30, 60, 75, 90 y 105 días después de la siembra.	Longitud desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja más larga.	Libreta de campo Flexómetro
	Número de tallos	Conteo visual. Se midió a los 30, 60, 75, 90 y 105 días después de la siembra.	Conteo manual de hojas verdaderas fotosintéticamente activas.	Libreta de campo
	Diámetro del tallo	En mm. Se midió a los 30, 60, 75, 90 y 105 días después de la siembra.	Medición del grosor del cuello de la planta en el medio del tallo.	Libreta de campo Calibrador pie de rey

Rendimiento	En kg. Se midió a la cosecha 180 días después de la siembra.	Peso fresco de tubérculos comerciales obtenidas en la parcela de la unidad experimental.	Libreta de campo Bascula
Clasificación por categorías	Cat 1 > 120 g Cat 2 de 80 a 120 g Cat 3 de 50 a 80 g Cat 4 <50 g	Categorización según peso del tubérculo. (Rivadeneira <i>et al.</i> 2021)	Libreta de campo
Beneficio/Costo	En USD. Al finalizar la investigación de campo	Cociente entre los ingresos brutos y los costos totales de producción por tratamiento.	Libreta de campo Computadora

3.4. MÉTODOS UTILIZADOS

3.4.1. Área de estudio

El presente ensayo experimental se desarrolló en el Centro Experimental "San Francisco", estación de investigación dependiente de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC). El predio se localiza administrativamente en el cantón Huaca, provincia del Carchi, Ecuador. El sitio de ensayo se encuentra georreferenciado mediante las coordenadas 0°46'53" de Latitud Norte y 77°41'38" de Longitud Oeste. De acuerdo con las variables agroclimáticas de la zona, el centro se ubica a una altitud de 2.890 m s. n. m., registrando una temperatura media anual de 11,5 °C y una precipitación de 950 mm. Bajo estos parámetros, la zona de vida se clasifica como estepa espinosa Montano Bajo (ee-MB), siguiendo los criterios de Peña (2012). La ubicación espacial detallada se ilustra en la Figura 3.

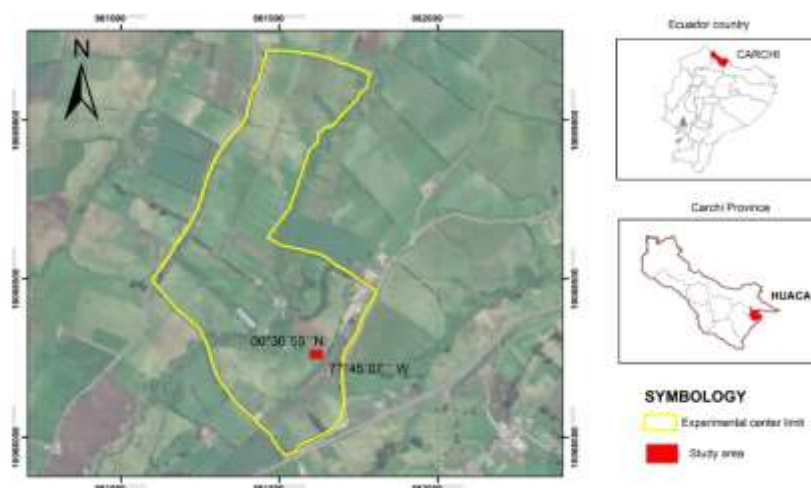


Figura 3. Ubicación del experimento

3.4.2. Tratamientos del diseño experimental

La investigación se constituyó de 14 tratamientos que se describen a continuación:

Tabla 3. Tratamientos del experimento

Tratamientos		Frecuencia de aplicación
T1	Fertilización convencional 100% + micorriza	Fertilización edáfica Al retape 20 días después de la siembra
T2	Fertilización convencional 75% + micorriza	
T3	Fertilización Análisis suelo 100% + micorriza	Bioinsumos Resid HC a la siembra 1 sola aplicación
T4	Fertilización Análisis suelo 75% + micorriza	
T5	Fertilización convencional 100%	
T6	Fertilización Análisis suelo 100%	
T7	Testigo absoluto	

3.4.3. Características del diseño experimental

Para el análisis del comportamiento del cultivo, se implementó el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA). El esquema experimental incluyó siete tratamientos con cuatro réplicas cada uno, dando como resultado un universo de 28 unidades experimentales. La evaluación fenológica y productiva se realizó sobre una muestra de 12 plantas por unidad, garantizando la representatividad de los resultados obtenidos.

Tabla 4. Características del experimento

Diseño de bloques completamente al azar	Dimensiones
Tratamientos	7
Repeticiones	4
Unidades experimentales	28
Área de unidad experimental	(6m x 5m) 30 m ²
Área total del experimento	1914 m ²
Distancia entre plantas	0,50 cm
Distancia entre surcos	1 m
Plantas por unidad experimental	60
Parcela neta	12
Distancia entre parcelas	1m
Distancia entre bloques	2m

3.4.4. Distribución y características del experimento

Para la delimitación física del experimento, se empleó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA). Las 28 unidades experimentales (resultado de 7 tratamientos y 4 repeticiones) fueron marcadas individualmente usando estacas, piola y un rótulo, definiendo así parcelas de 30 m². Considerando los caminos de 1 m y la separación de 2 m entre bloques, el ensayo ocupó un área total de 1914 metros cuadrados.

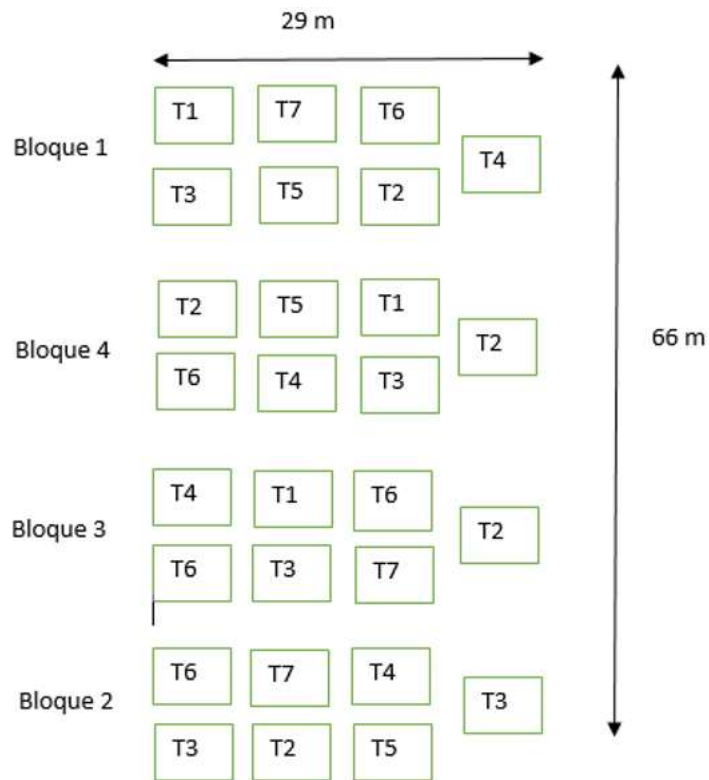


Figura 4. Distribución del ensayo

3.4.5. Población y muestra de la investigación

El ensayo se estableció con un total de 28 unidades experimentales, correspondientes a 7 tratamientos y 4 repeticiones. Para la evaluación de las variables, la muestra se obtuvo de la parcela neta, seleccionando 12 plantas del centro de cada unidad experimental.

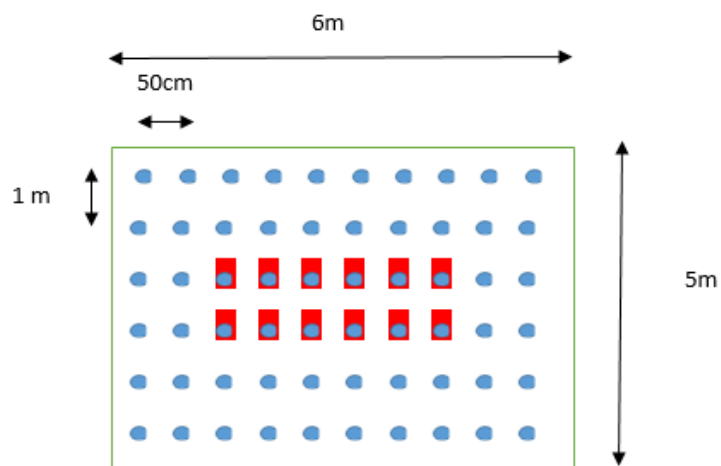


Figura 5. Parcela neta

3.4.6. Procedimientos

1. Análisis de suelo

Previo al establecimiento del ensayo, se tomó una muestra compuesta de suelo del lote experimental siguiendo un muestreo en zigzag. La muestra fue procesada en el laboratorio LBONORT (Ibarra), donde se realizó un análisis físico-químico completo. Los resultados permitieron determinar la línea base nutricional (niveles de materia orgánica, pH y macro/micronutrientes), datos que sirvieron para el cálculo de las dosis de fertilización de los tratamientos basados en Análisis de Suelo (T3, T4 y T6).

2. Preparación del terreno

La preparación del suelo se realizó de forma mecanizada 30 días antes de la siembra. Se ejecutó una arada profunda y dos pases de rastra cruzada para lograr una cama de siembra óptima, facilitando la aireación y el drenaje, condiciones necesarias para la simbiosis con el hongo micorrízico.

3. Trazado y delimitación

Se procedió a la delimitación física de las 28 unidades experimentales siguiendo el Diseño de Bloques Completos al Azar. Cada parcela midió 30 m² (6 m x 5 m). Se utilizaron estacas y piolas para marcar los bloques, dejando caminos de separación de 1 m entre parcelas y 2 m entre bloques para facilitar las labores de evaluación y evitar el efecto de borde.

4. Inoculación de la semilla y Siembra

Se utilizó semilla de papa variedad Súper Chola (peso promedio 75g). Para los tratamientos con micorriza (T1, T2, T3 y T4), se aplicó el bioinsumo *Glomus iranicum var. tenuihypharum* (Resid HC) en dosis de 1 kg/ha.

- Procedimiento: Los tubérculos fueron humedecidos con agua desclorada al 2%. Posteriormente, se espolvoreó el producto y se removió suavemente para asegurar que las esporas se adhirieran a la piel y los brotes.

5. Fertilización fraccionada

La fertilización se dividió en dos etapas fundamentales:

- Retape (Fondo): Realizado a los 20 dds. Se aplicaron las fuentes de Fósforo y Nitrógeno según las dosis de 100% y 75% definidas en la Tabla 2.

- Aporque (60 dds): Coincidiendo con el alza de tierra, se aplicó la fertilización complementaria rica en Potasio para promover el llenado del tubérculo.

6. Manejo Fitosanitario

Se ejecutó un monitoreo constante de plagas (como *Bactericera cockerelli*) y enfermedades (*Phytophthora infestans*). Se aplicaron controles preventivos y curativos de forma homogénea en todas las unidades experimentales, asegurando que la respuesta del cultivo se deba únicamente a la interacción de la fertilización y la micorriza.

7. Toma de datos y Cosecha

Las variables agronómicas (altura, diámetro y tallos) se midieron a los 30, 60, 75, 90 y 105 dds. La cosecha se realizó manualmente a los 180 dds, recolectando únicamente las 12 plantas de la parcela neta para el pesaje y clasificación por categorías (Cat 1, 2, 3 y 4) según los estándares de Rivadeneira et al. (2021).

3.4.7. Variables evaluadas

3.4.7.1. Altura de planta

Para determinar el crecimiento longitudinal de la planta en centímetros (cm), se utilizó un flexómetro. La medición se realizó desde la base del cuello (nivel del suelo) hasta el ápice terminal del tallo principal. Esta evaluación se efectuó de forma quincenal a los 30, 60, 75, 90 y 105 días después de la siembra (dds), registrando los datos de las 12 plantas que conforman la parcela neta de cada unidad experimental.

3.4.7.2. Número de tallos

Se cuantificó mediante el conteo visual directo de los tallos principales emergidos por sitio de siembra. El registro se realizó de manera simultánea a la medición de la altura (30, 60, 75, 90 y 105 dds) en la muestra seleccionada de la parcela neta, considerando únicamente los tallos con desarrollo vigoroso.

3.4.7.3. Diámetro del tallo

Se empleó un calibrador digital (pie de rey) para medir en milímetros (mm) el grosor del tallo principal. La medición se ejecutó en el tercio medio del tallo para asegurar la representatividad del vigor de la planta. Al igual que las variables anteriores, se registró quincenalmente a los 30, 60, 75, 90 y 105 dds.

3.4.7.4. Rendimiento por parcela neta

Al momento de la cosecha (180 dds), se utilizó una balanza digital de precisión para determinar el peso fresco en kilogramos (kg) de la totalidad de tubérculos recolectados en la parcela neta. Con base en la producción obtenida por unidad experimental (30m²), se realizó la conversión técnica para proyectar el rendimiento a toneladas por hectárea (t/ha).

3.4.7.5. Clasificación por categorías

Posterior al pesaje total, los tubérculos de la parcela neta se clasificaron individualmente según su peso en cuatro categorías comerciales, siguiendo los criterios de Rivadeneira et al. (2021):

- Categoría 1 (Gruesa): > 120 g.
- Categoría 2 (Pareja): 80 a 120 g.
- Categoría 3 (Cochas): 50 a 80 g.
- Categoría 4 (Cuchi/Rechazo): < 50 g.

Se registró el peso total por cada categoría para determinar la influencia de la simbiosis micorrízica y la fertilización en la calidad del producto final.

3.4.7.6. Análisis costo - beneficio

Se realizó la evaluación financiera mediante el cálculo de la relación Beneficio/Costo (B/C). Para ello, se consolidaron los Ingresos Brutos (producidos por la venta del rendimiento comercial según precios de mercado) y los Costos Totales de producción. En estos últimos se incluyeron rubros de mano de obra, preparación del suelo y el costo específico de los insumos evaluados: fertilizantes minerales y el bioestimulante *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos experimentales, obtenidos a través de un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con siete tratamientos y cuatro repeticiones (28 unidades experimentales), serán procesados mediante el entorno estadístico R Studio.

De forma preliminar al análisis de varianza, se procedió a la verificación de los supuestos básicos de la estadística paramétrica: la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas a través del test de Bartlett. Una vez validados dichos supuestos, se ejecutó el Análisis de Varianza

(ANOVA) para determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. En las variables donde se detectó significancia estadística, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0,05$) con el fin de establecer la jerarquía de los promedios y determinar el mejor tratamiento en términos de rendimiento y vigor vegetativo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Altura de planta

El análisis de varianza (Tabla 5) evidenció que el efecto de los bloques fue significativo ($p < 0,01$) únicamente durante los primeros 60 días, perdiendo relevancia en las etapas finales del ciclo. Respecto a los tratamientos, se detectó una respuesta altamente significativa ($p < 0,001$) a los 90 y 105 días, lo que sugiere un efecto fisiológico acumulativo y progresivo del manejo aplicado sobre la elongación del tallo. La investigación presentó una alta precisión experimental con coeficientes de variación inferiores al 15 por ciento en todas las etapas, alcanzando una altura promedio final de 77,98 cm.

Tabla 5. Análisis de varianza para la altura de planta (30 a 105 dds)

F.v	GL	Alt 1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5	Alt 6
		30 dds	(45 dds)	(60 dds)	(75 dds)	(90 dds)	(105 dds)
		p valor					
Bloques	3	0.00158 **	0.00474 **	51e-06 ***	0.1461	0.091459	0.74
Tratamientos	6	0.47146	0.52850	0.0645	0.0881	0.000939 ***	1.53e-05 ***
Error	18						
Total	27						
Media (cm)		22.30	30.96	42.46	53.20	68.35	77.98
CV (%)		14.71	12.82	9.73	11.69	10.19	7.65

Nota. Significado de los códigos: 0 '***' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

La prueba de rangos múltiples de Tukey al 5% (Tabla 6) identificó tres grupos de significancia para las etapas finales del cultivo. A los 90 días, los tratamientos T2 (78,83 cm), T1 (76,10 cm) y T5 (75,60 cm) lideraron el crecimiento vegetativo sin diferencias estadísticas entre sí. Esta tendencia se confirmó a los 105 días, donde el grupo superior (a) estuvo conformado nuevamente por el T2 (90,64 cm), T1 (88,23 cm) y T5 (86,20 cm). Es relevante destacar que el T2, con una reducción del 25 por ciento en la fertilización convencional más la aplicación de micorrizas, alcanzó el mayor desarrollo numérico.

Por el contrario, el testigo absoluto (T7) presentó el crecimiento más limitado en ambas etapas, con un promedio final de 63,37 cm, lo que indica que la inoculación con *Glomus iranicum* permite optimizar el uso de fertilizantes edáficos en la variedad Superchola.

Tabla 6. Prueba de Tukey al 5% para la altura de planta (90 a 105 dds)

Tratamientos	Alt 5 (90 dds)		Alt 6 (105 dds)	
	Medias (cm)	Grupos	Medias (cm)	Grupos
T1 Fertilización convencional 100% + micorriza	76,10	a	88,23	a
T2 Fertilización convencional 75% + micorriza	78,83	a	90,64	a
T3 Fertilización Análisis suelo 100% + micorriza	68,16	abc	75,49	b
T4 Fertilización Análisis suelo 75% + micorriza	59,60	bc	68,71	bc
T5 Fertilización convencional 100%	75,60	ab	86,20	a
T6 Fertilización Análisis suelo 100%	64,12	abc	73,20	b
T7 Testigo absoluto	56,04	c	63,37	c

4.1.2. Número de tallos

El análisis de varianza (Tabla 7) mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en los bloques durante todas las etapas de evaluación, reflejando una influencia persistente de la variabilidad del terreno sobre esta variable. Respecto a los tratamientos, no se detectó significancia estadística ($p > 0,05$) en ninguna de las fases, lo que indica que el número de tallos por planta no respondió al manejo nutricional ni a la inoculación micorrízica, manteniéndose dependiente de las reservas del tubérculo semilla. La precisión experimental fue alta, con coeficientes de variación inferiores al 16% en todos los cortes y un promedio final de 4,54 tallos por planta.

Tabla 7. Análisis de varianza para el número de tallos (30 a 105 dds)

F.v	GL	Tallos 1	Tallos 2	Tallos 3	Tallos 4	Tallos 5	Tallos 6
		30 dds)	(45 dds)	(60 dds)	(75 dds)	(90 dds)	(105 dds)
		p valor					
Bloques	3	0.000204 ***	0.0127 *	0.00949 **	0.00197 **	0.00148 **	0.0165 *
Tratamientos	6	0.634396	0.6037	0.08186	0.57702	0.51947	0.7843
Error	18						
Total	27						
Media (#)		2.93	3.24	3.53	3.89	4.40	4.54
CV (%)		15.96	15.83	13.47	13.28	10.14	10.06

Nota. Significado de los códigos: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '' 1.

4.1.3. Diámetro de tallo

El análisis de varianza (Tabla 8) evidenció que el efecto de los bloques fue significativo ($p < 0,05$) a partir de los 60 días, manteniéndose esta tendencia hasta la evaluación final. Respecto a los tratamientos, se detectó significancia estadística ($p < 0,05$) desde

los 75 hasta los 105 días, lo que indica que el manejo de la fertilización y la inoculación con micorrizas influyeron de manera progresiva en el engrosamiento de los tallos. La investigación presentó una alta precisión experimental con coeficientes de variación inferiores al 15 por ciento en todas las etapas, alcanzando un diámetro promedio final de 10,70 mm.

Tabla 8. Análisis de varianza para el diámetro de tallo (30 a 105 dds)

F.v	GL	Tallos 1	Tallos 2	Tallos 3	Tallos 4	Tallos 5	Tallos 6
		30 dds)	(45 dds)	(60 dds)	(75 dds)	(90 dds)	(105 dds)
p valor							
Bloques	3	0.0593	0.0849	0.0107 *	0.00358 **	0.000496 ***	0.00112 **
Tratamientos	6	0.9488	0.3477	0.3510	0.02711 *	0.022549 *	0.04341 *
Error	18						
Total	27						
Media (mm)		6.00	6.91	8.23	9.25	9.44	10.70
CV (%)		11.66	10.65	11.48	12.25	11.62	11.62

Nota. Significado de los códigos: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '' 1.

La prueba de rangos múltiples de Tukey al 5% (Tabla 9) definió dos grupos de significancia para el engrosamiento del tallo en las etapas finales del cultivo. Durante las tres evaluaciones (75, 90 y 105 dds), el tratamiento T1 (Fertilización convencional 100% + micorriza) lideró el desarrollo alcanzando los mayores valores numéricos, con un promedio final de 12,67 mm, consolidándose en el grupo superior (a). Es importante destacar que el tratamiento T2, que incluye una reducción del 25 por ciento de fertilización más el uso de micorrizas, mantuvo un desempeño estadísticamente similar al grupo líder (ab). Por el contrario, el testigo absoluto (T7) presentó consistentemente el menor diámetro, con un promedio de 9,46 mm al cierre del ciclo, integrando el grupo inferior (b). Estos resultados confirman que la simbiosis con *Glomus iranicum* favorece el vigor estructural de la planta de papa.

Tabla 9. Prueba de Tukey al 5% para diámetro de tallo (75 a 105 dds)

Tratamientos	Tallos 4		Tallos 5		Tallos 6	
	Medias (mm)	Grupos	Medias (mm)	Grupos	Medias (mm)	Grupos
T1 Fertilización convencional 100% + micorriza	10,97	a	11,16	a	12,67	a
T2 Fertilización convencional 75% + micorriza	9,89	ab	9,85	ab	11,04	ab
T3 Fertilización Análisis suelo 100% + micorriza	8,93	ab	9,00	ab	10,08	ab
T4 Fertilización Análisis suelo 75% + micorriza	8,18	b	8,60	ab	10,05	ab
T5 Fertilización convencional 100%	9,72	ab	9,91	ab	10,95	ab
T6 Fertilización Análisis suelo 100%	8,87	b	9,41	ab	10,64	ab
T7 Testigo absoluto	8,20	b	8,13	b	9,46	b

4.1.4. Número de tubérculos

El análisis de varianza (Tabla 10) evidenció que el efecto de los bloques fue significativo para la Categoría 1 ($p < 0,05$) y altamente significativo en la Categoría 2 ($p < 0,01$). Respecto a los tratamientos, se detectó una respuesta altamente significativa ($p < 0,001$) únicamente para la Categoría 1, lo que indica que el manejo de la fertilización y la inoculación con micorrizas influyeron de manera determinante en la formación de tubérculos de mayor calibre comercial. Las categorías 2, 3, 4 y el número total de tubérculos no mostraron diferencias estadísticas ($p > 0,05$). La precisión experimental fue alta, con coeficientes de variación inferiores al 20 por ciento en todas las categorías, alcanzando un promedio general de 26,11 tubérculos por planta.

Tabla 10. Análisis de varianza para número de tubérculos (180 dds)

F.v	GL	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4	Total	p valor	
Bloques	3	0.0118 *	0.00217 **	0.054	0.211	0.198		
Tratamientos	6	1.17e-05 ***	0.10064	0.564	0.468	0.130		
Error	18							
Total	27							
Media (#)		3.88	4.54	5.62	12.05	26.11		
CV (%)		11.35	14.54	12.04	16.82	18.14		

Nota. Significado de los códigos: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '.' ' 1.

La prueba de rangos múltiples de Tukey al 5% (Tabla 11) identificó cuatro grupos de significancia para la producción de tubérculos de mayor calibre comercial. El tratamiento T1 (Fertilización convencional 100% + micorriza) registró el mayor promedio con 6,31 tubérculos por planta, liderando el grupo superior (a). Es relevante destacar que el tratamiento T2, que emplea solo el 75 por ciento de la fertilización convencional junto con la inoculación de micorrizas, alcanzó 5,89 tubérculos, mostrando una similitud estadística con los niveles de fertilización completa (T1 y T5). Por el contrario, el testigo absoluto (T7) presentó el menor desempeño con apenas 1,04 tubérculos por planta, situándose en el grupo inferior (d). Estos resultados demuestran que la simbiosis con *Glomus iranicum* potencia significativamente la obtención de tubérculos de primera calidad, permitiendo una reducción del 25 por ciento en el aporte de fertilizante edáfico sin comprometer la categoría comercial.

Tabla 11. Prueba de Tukey al 5% para Número de tubérculos Categoría 1 (180 dds)

Tratamientos	Categoría 1	
	Medias (#)	Grupos
T1 Fertilización convencional 100% + micorriza	6,31	a

T2	Fertilización convencional 75% + micorriza	5,89	abc
T3	Fertilización Análisis suelo 100% + micorriza	3,12	cd
T4	Fertilización Análisis suelo 75% + micorriza	1,62	d
T5	Fertilización convencional 100%	5,98	ab
T6	Fertilización Análisis suelo 100%	3,18	bcd
T7	Testigo absoluto	1,04	d

4.1.5. Peso promedio de tubérculo por categorías

El análisis de varianza (Tabla 12) mostró diferencias significativas ($p < 0,01$) en los bloques únicamente para el peso de la Categoría 3, efecto que no se presentó en las demás categorías. Respecto a los tratamientos, no se detectó significancia estadística ($p > 0,05$) en ninguna de las categorías evaluadas, lo que indica que el peso individual de los tubérculos no fue influenciado por los niveles de fertilización ni por la inoculación con micorrizas. La precisión experimental fue alta, con coeficientes de variación inferiores al 16 por ciento en todos los casos y pesos promedios generales de 174,2 g, 95,94 g, 63,62 g y 27,77 g para las categorías 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

Tabla 12. Análisis de varianza para Peso promedio de tubérculo por categorías (180 dds)

F.v	GL	Cat 1	Cat 2	Cat 3		Cat 4
				p valor		
Bloques	3	0.912	0.218	0.00516 **		0.0713
Tratamientos	6	0.162	0.812	0.37993		0.3169
Error	18					
Total	27					
Media (g)		174.2	95.94	63.62		27.77
CV (%)		15.50	11.75	10.48		14.39

Nota. Significado de los códigos: 0 ****' 0.001 ***' 0.01 **' 0.05 .' 0.1 ' ' 1.

4.1.6. Rendimiento por ha

El análisis de varianza (Tabla 13) mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) en los bloques para la mayoría de las categorías, a excepción de la categoría 4, lo que refleja la influencia de la variabilidad del terreno sobre la productividad. Respecto a los tratamientos, se detectó significancia altamente estadística ($p < 0,001$) únicamente en la Categoría 1 y en el rendimiento total, lo que indica que la fertilización y la inoculación con *Glomus iranicum* potenciaron tanto la productividad de mayor valor comercial como el volumen de cosecha final. La precisión experimental fue aceptable, con coeficientes de variación que promediaron el 19 por ciento y un rendimiento promedio total de 30536 kg/ha.

Tabla 13. Análisis de varianza para el rendimiento por categorías (180dds)

F.v	GL	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4	Total
		p valor				
Bloques	3	0.0156 *	0.00137 **	0.0191 *	0.3387	0.00632 **
Tratamientos	6	54e-07 ***	0.18628	0.6218	0.0738	8.1e-05 ***
Error	18					
Total	27					
Media (kg/ha)		11732	7393	6048	5363	30536
CV (%)		18.44	17.37	18.02	22.95	21.18

Nota. Significado de los códigos: 0 '***' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '.' 1.

La prueba de rangos múltiples de Tukey al 5 por ciento (Tabla 14) estableció tres grupos de significancia para la productividad final del cultivo. En la Categoría 1, el tratamiento T1 (Fertilización convencional 100% + micorriza) alcanzó el mayor rendimiento con 21958,33 kg/ha, integrando el grupo superior (a). Respecto al rendimiento total, tanto el T1 como el T5 (Fertilización convencional 100%) lideraron la producción con 42500,00 kg/ha y 42208,33 kg/ha, respectivamente, conformando el grupo de mayor desempeño. Es fundamental resaltar que el tratamiento T2, que emplea solo el 75 por ciento de la fertilización convencional junto con micorrizas, se mantuvo en el grupo de alta competitividad estadística (ab) en ambas variables, demostrando una eficiencia productiva similar a los manejos de dosis completa. Finalmente, el testigo absoluto (T7) registró los valores más bajos con un rendimiento total de 18833,33 kg/ha (grupo c). Estos hallazgos confirman que la aplicación de *Glomus iranicum* potencia significativamente el volumen de cosecha y permite optimizar la inversión en fertilizantes.

Tabla 14. Prueba de Tukey al 5% para el rendimiento Categoría 1 y total (180dds)

Tratamientos	Categoría 1		Total	
	Medias (kg/ha)	Grupos	Medias (kg/ha)	Grupos
T1 Fertilización convencional 100% + micorriza	21958,33	a	42500,00	a
T2 Fertilización convencional 75% + micorriza	17291,66	ab	37416,67	ab
T3 Fertilización Análisis suelo 100% + micorriza	8791,66	c	25333,33	bc
T4 Fertilización Análisis suelo 75% + micorriza	4250,00	c	20416,67	c
T5 Fertilización convencional 100%	17041,67	ab	42208,33	a
T6 Fertilización Análisis suelo 100%	10166,66	bc	27041,67	bc
T7 Testigo absoluto	2625,99	C	18833,33	c

4.1.7. Análisis costo - beneficio

El análisis económico (Tabla 15) permitió determinar la viabilidad financiera de los tratamientos considerando los rendimientos obtenidos por categoría y los precios actuales del mercado.

Utilidad Neta: El tratamiento T1 (Fertilización convencional 100% + micorriza) se consolidó como la opción más rentable de la investigación, generando una utilidad neta de 9123,33 USD/ha. Es fundamental destacar el desempeño del tratamiento T2 (Fertilización convencional 75% + micorriza), el cual alcanzó una utilidad de 7777,91 USD/ha, superando al testigo comercial T5 (Convencional 100% sin micorriza) que registró 7488,60 USD/ha. Este hallazgo demuestra que la inclusión de micorrizas permite reducir la fertilización en un 25% y aun así obtener una rentabilidad superior al manejo tradicional.

Relación Costo/Beneficio (C/B): En términos de eficiencia financiera, el T1 lideró con un índice de 1,73, seguido por el T2 con 1,63. Esto indica que por cada dólar invertido en el T1, el agricultor recupera su capital y obtiene 0,73 USD de ganancia neta. Por el contrario, los tratamientos basados en el análisis de suelo (T3, T4 y T6) y el testigo absoluto (T7) presentaron índices de costo/beneficio inferiores a 1,00 (0,79; 0,30; 0,91 y 0,60 respectivamente), lo que representa pérdidas económicas bajo las condiciones de este ensayo. Estos resultados validan que la simbiosis con *Glomus iranicum* optimiza la inversión económica en el cultivo de papa Superchola.

Tabla 15. Análisis costo/beneficio

Tratamientos	RENDIMIENTO				PRECIO DE VENTA				INGRESOS				Total, ingresos USD/saco	Costo por tratamiento USD/ha	Utilidad neta USD	Costo beneficio	Beneficio directo
	Categoría 1 sacos/ha)	Categoría 2 sacos/ha)	Categoría 3 sacos/ha)	Categoría 4 sacos/ha)	Categoría 1 USD/saco	Categoría 2 USD/saco	Categoría 3 USD/saco	Categoría 4 USD/saco	Categoría 1 USD/saco	Categoría 2 USD/saco	Categoría 3 USD/saco	Categoría 4 USD/saco					
T1	439,17	185,00	120,83	99,17	20,00	15,00	5,00	2,00	8783,33	2775,00	604,17	198,33	12360,83	5275,00	9123,33	1,73	0,73
T2	345,83	193,33	130,00	79,17	20,00	15,00	5,00	2,00	6916,66	2900,00	650,00	158,33	10625,00	4768,75	7777,91	1,63	0,63
T3	175,83	143,33	100,83	86,67	20,00	15,00	5,00	2,00	3516,66	2150,00	504,17	173,33	6344,16	4262,50	3367,49	0,79	-0,21
T4	85,00	110,83	113,33	99,17	20,00	15,00	5,00	2,00	1700,00	1662,50	566,67	198,33	4127,50	4009,38	1187,29	0,30	-0,70
T5	340,83	169,37	160,83	179,17	20,00	15,00	5,00	2,00	6816,67	2540,50	804,17	358,33	10519,67	5025,00	7488,60	1,49	0,49
T6	203,33	102,50	109,17	125,83	20,00	15,00	5,00	2,00	4066,66	1537,50	545,83	251,67	6401,66	4012,50	3649,16	0,91	-0,09
T7	52,50	130,83	111,67	81,67	20,00	15,00	5,00	2,00	1050,00	1962,50	558,33	163,33	3734,16	3000,00	1790,00	0,60	-0,40

Nota: T1 Fertilización convencional 100% + micorriza, T2 Fertilización convencional 75% + micorriza, T3 Fertilización Análisis suelo 100% + micorriza
T4 Fertilización Análisis suelo 75% + micorriza, T5 Fertilización convencional 100%, T6 Fertilización Análisis suelo 100%, T7 Testigo absoluto

4.2. DISCUSIÓN

Análisis del comportamiento fenológico y desarrollo vegetativo

El análisis del crecimiento vegetativo del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Superchola reveló una dinámica de respuesta diferenciada a lo largo del ciclo fenológico. Respecto a la altura de planta, los resultados evidenciaron que la influencia de la inoculación con *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* no fue inmediata, manifestándose estadísticamente significativa recién a partir de los 90 días después de la siembra (dds) y consolidándose a los 105 dds. En esta etapa final, los tratamientos T1 (100% Fertilización química + Micorriza) y T2 (75% Fertilización química + Micorriza) lograron promedios superiores, alcanzando una media general de 77,98 cm.

Este comportamiento de "respuesta tardía" es consistente con la fisiología de la simbiosis micorrízica descrita por Contreras-Pino et al. (2025), quienes explican que, durante las primeras etapas de colonización, el hongo demanda carbono de la planta hospedera para establecer su red de hifas extrarradicales. Por tanto, en la fase inicial (30-60 días), la planta invierte energía en esta asociación, lo que justifica la ausencia de diferencias significativas en altura durante el arranque. Sin embargo, una vez establecida la simbiosis, el hongo retribuye esta inversión maximizando la absorción de nutrientes, lo que se tradujo en el vigor superior observado en la etapa de floración y llenado de tubérculo. Es imperativo señalar que en los suelos de la zona de Huaca, caracterizados por bajas temperaturas, la tasa de colonización inicial suele ser más lenta, lo que refuerza la observación de que los beneficios biomásicos se concentren en el último tercio del ciclo del cultivo.

De manera similar, el diámetro del tallo mostró una respuesta positiva significativa hacia el final del ciclo (75, 90 y 105 dds), donde el tratamiento T1 lideró con un grosor de 12,67 mm, seguido estadísticamente de cerca por el T2. Estos resultados superan lo reportado en condiciones convencionales y concuerdan con los hallazgos de Tobar (2024) en suelos de Huaca, quien determinó que la cepa *G. iranicum* induce cambios morfológicos en el tallo debido a una mayor síntesis de citoquininas y giberelinas, hormonas vegetales estimuladas por la actividad radicular mejorada. Un tallo más grueso, como el obtenido en los tratamientos inoculados, implica un sistema vascular (xilema y floema) más robusto, capaz de traslocar una mayor cantidad de

fotoasimilados desde las hojas hacia los tubérculos, mecanismo que explica la correlación directa encontrada posteriormente con el rendimiento. La robustez del tallo también confiere a la planta una mayor resistencia mecánica ante factores bióticos y abióticos, un aspecto crítico en la provincia del Carchi donde los vientos y la humedad relativa pueden propiciar el acame o el desarrollo de patógenos.

Por el contrario, la variable número de tallos por planta no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, manteniéndose en un promedio de 4,54 tallos. Este resultado, lejos de ser negativo, confirma la estabilidad genética de la variedad Superchola. Tal como lo señala Benavides (2025) en sus estudios con la variedad Puca Shungo, el número de tallos principales está determinado primariamente por la edad fisiológica del tubérculo-semilla, el tamaño de la misma y el número de "ojos" viables al momento de la siembra, siendo una variable poco sensible a la fertilización edáfica post-emergencia. El hecho de que la reducción del fertilizante en el T2 y T4 no haya disminuido el número de tallos valida que la nutrición inicial fue suficiente para sostener la brotación, independientemente de la dosis aplicada. Esta estabilidad asegura que el número de sitios de formación de tubérculos (estolones) no se vea comprometido por la reducción del 25% de la carga química inicial.

Dinámica del Rendimiento y Productividad en Suelos Andisoles

El hallazgo más contundente de esta investigación radica en el rendimiento total y por categorías. El tratamiento T1 alcanzó una producción de 42,50 t/ha, un valor que no solo es estadística y económicamente superior al testigo absoluto (18,83 t/ha), sino que valida el alto potencial agronómico de la zona de intervención. Al contrastar este dato con la literatura local, se observa una coincidencia técnica con Mora (2018), quien reportó en la UPEC rendimientos techo de 45,16 t/ha mediante el uso de biofertilizantes. Esta similitud sugiere que, bajo las condiciones edafoclimáticas del Carchi, la implementación de biotecnología permite a la variedad Superchola expresar casi la totalidad de su potencial genético productivo. El manejo eficiente de la simbiosis micorrízica actúa como un catalizador que permite a la planta aprovechar las condiciones óptimas de radiación y humedad del sector San Francisco para la síntesis de almidón.

Sin embargo, al comparar nuestros resultados con investigaciones en otras zonas geográficas, la diferencia es notable. El rendimiento obtenido en esta tesis es superior

en más de un 100% a lo reportado por Luna (2022) en la provincia de Imbabura (20,00 t/ha). Esta brecha productiva no debe interpretarse únicamente como una diferencia climática, sino también metodológica y edáfica; mientras que Luna evaluó la misma cepa en suelos de textura más ligera y con menor contenido de materia orgánica, nuestros datos sugieren que la interacción de *G. iranicum* con los suelos negros (Andisoles) de Huaca potencia exponencialmente la actividad del hongo. No obstante, existe una coincidencia determinante entre ambos estudios respecto a la calidad: Luna reportó que, independientemente del rendimiento total, la micorriza incrementó significativamente la proporción de "papa gruesa", lo cual se ratifica en nuestra investigación con el dominio de la Categoría 1 en los tratamientos inoculados. Esto permite concluir que la capacidad de esta cepa para mejorar el calibre es una característica genética estable, mientras que el volumen final de toneladas está condicionado por la sinergia con la fertilidad natural del suelo, siendo el escenario del Carchi mucho más propicio para esta biotecnología.

Esta brecha productiva también se atribuye a la eficiencia específica de la cepa *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*. A diferencia de las cepas nativas o de *Glomus intraradices* usadas en otros estudios citados, la cepa utilizada en esta investigación ha demostrado, según Contreras-Pino et al. (2025), una capacidad superior para esporular y colonizar raíces en condiciones de estrés o alta competencia, lo que se traduce en una absorción de agua y nutrientes mucho más agresiva. En un contexto de variabilidad climática, esta capacidad de resiliencia del hongo proporciona un seguro productivo al agricultor, manteniendo tasas de absorción hídrica estables incluso en periodos de estrés hídrico moderado.

Es crucial destacar el comportamiento de la Categoría 1 (papa gruesa > 120g). La inoculación con micorrizas en el T1 y T2 potenció significativamente la producción de tubérculos de gran calibre, con medias de 21,96 t/ha y 17,29 t/ha respectivamente. Esto indica que el bioinsumo no solo aumenta la biomasa total, sino que mejora la calidad comercial. Fisiológicamente, esto se explica porque las hifas micorrízicas aumentan la conductividad hidráulica de la raíz, permitiendo mantener una alta tasa de turgencia celular en los tubérculos durante la fase de llenado, factor determinante para el tamaño final. Un sistema radicular expandido por las hifas garantiza un flujo continuo de potasio, elemento esencial para el transporte de azúcares hacia los órganos de almacenamiento.

Validación de la Reducción de Fertilizante (Sostenibilidad del T2)

El aporte científico más relevante de este Trabajo de Integración Curricular es la validación estadística del tratamiento T2 (75% Fertilización convencional + Micorrizas). Los resultados demostraron que este tratamiento alcanzó un rendimiento total de 37,42 t/ha, ubicándose en el mismo grupo de significancia (ab) que el tratamiento de fertilización química al 100% (T5), que obtuvo 42,21 t/ha. Estadísticamente, esto significa que no existen diferencias productivas reales entre aplicar el 100% del fertilizante químico y aplicar solo el 75% si se acompaña de micorrizas.

Este hallazgo respalda robustamente la hipótesis de la sustitución parcial de insumos sintéticos y concuerda con lo expuesto por Chamorro et al. (2021). No obstante, es fundamental destacar las diferencias metodológicas que explican la superioridad de nuestros rendimientos frente a los obtenidos por dichos autores (25,32 t/ha). Mientras que Chamorro et al. utilizaron el producto *Safer Micorrizas*, el cual consiste en un consorcio generalista de hongos micorrízicos con una concentración de propágulos variable, en esta investigación se empleó el producto comercial *Resid HC*. Este último está formulado con una cepa pura de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* a una concentración garantizada de $1,2 \times 10^4$ propágulos por cada 100 ml, lo que asegura una colonización más rápida y agresiva. Esta distinción técnica es crucial, ya que la cepa pura en *Resid HC* posee una mayor tolerancia a la salinidad de los fertilizantes químicos en comparación con las mezclas de cepas nativas o generalistas, permitiendo elevar el techo productivo en suelos Andisoles que presentan alta retención de fósforo debido a la presencia de alófanos.

Por lo tanto, el tratamiento T2 no está "produciendo menos con menos", sino que está siendo más eficiente en el uso de los recursos del suelo. En los suelos del Carchi, la fijación de fósforo es un problema recurrente; la introducción de micorrizas específicas rompe este bloqueo mineral. Al reducir un 25% la carga química, se disminuye la salinidad de la rizosfera, lo que a su vez favorece una mayor colonización micorrízica, creando un círculo virtuoso de nutrición biológica. Esto contradice la creencia tradicional de que "a mayor fertilizante, mayor producción", demostrando que la eficiencia simbiótica puede suplir eficazmente las reducciones de NPK sintético, minimizando además el impacto ambiental por lixiviación de nitratos o eutrofización.

Análisis Económico y Viabilidad Comercial

Desde la perspectiva financiera, la discusión trasciende el rendimiento físico para centrarse en la rentabilidad neta. El tratamiento T1 generó la mayor utilidad neta (9.123,33 USD/ha) con una relación beneficio/costo de 1,73. Sin embargo, el tratamiento T2, con una utilidad de 7.777,91 USD/ha y un B/C de 1,63, superó en eficiencia financiera al testigo convencional T5 (7.488,60 USD/ha).

Este dato es revelador: el agricultor que aplica el manejo T2 gasta menos dinero en fertilizantes (costo variable más bajo), se expone menos a la volatilidad de precios de los agroquímicos importados y obtiene una ganancia neta superior a la del agricultor convencional. Estos resultados son superiores en competitividad a los presentados por Quimbita (2024), quien analizó sistemas de producción intensiva en la sierra centro, concluyendo que la dependencia exclusiva de insumos externos reduce peligrosamente los márgenes de ganancia ante fluctuaciones del mercado. La implementación de micorizas actúa como un seguro financiero que amortigua los altos costos de producción actuales en el rubro papa.

La ventaja económica del T1 y T2 radica en el calibre del producto. Al haber obtenido una mayor proporción de tubérculos de Categoría 1 (cuyo precio de mercado es significativamente más alto que las categorías 2 y 3), el ingreso bruto se disparó. Esto demuestra que la bio-tecnología aplicada incide directamente en el parámetro que define el precio de venta: el tamaño. Por el contrario, los tratamientos basados únicamente en análisis de suelo sin corrección biológica (T3, T4, T6) y el testigo absoluto (T7) mostraron indicadores económicos negativos o muy bajos ($B/C < 1$ en varios casos), evidenciando que, en los suelos actuales, la agricultura sin una estrategia de nutrición integrada (Química + Biológica) es una actividad de alto riesgo financiero. La baja eficiencia de los tratamientos basados solo en análisis de suelo sugiere que el desequilibrio microbiológico del terreno impide la asimilación eficiente de las fórmulas químicas prescritas.

Síntesis y Proyecciones Agronómicas

La discusión de los resultados permite afirmar que la inoculación con *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en el cultivo de papa Superchola actúa como un catalizador fisiológico que optimiza la eficiencia nutricional y la partición de carbono hacia los

órganos de reserva. Los datos obtenidos refutan la necesidad de mantener dosis saturadas de fertilización química, validando que una reducción del 25% es técnica y económicamente viable, permitiendo incluso superar los rendimientos convencionales en términos de calidad comercial. La consistencia de estos resultados con investigaciones locales previas (Mora, 2018; Chamorro et al., 2021; Tobar, 2024) sugiere la existencia de un patrón de respuesta estable en la zona norte del Ecuador.

Esta tecnología representa un cambio de paradigma hacia una agricultura más sostenible, resiliente ante el cambio climático y, sobre todo, rentable para el pequeño y mediano productor del Carchi. La integración de microorganismos benéficos no debe considerarse un complemento opcional, sino un pilar fundamental de la nutrición vegetal moderna que garantiza la salud del suelo a largo plazo y la seguridad alimentaria regional.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La inoculación con *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* ejerció un efecto positivo tardío en el vigor de la planta, logrando en los tratamientos T1 (100% Fertilización + Micorriza) y T2 (75% Fertilización + Micorriza) las mayores alturas (promedio de 88,45 cm) y diámetros de tallo (>11,50 mm) hacia el final del ciclo fenológico (105 dds). No se observaron diferencias significativas en el número de tallos por planta (promedio de 4,54), confirmando que esta variable es un rasgo de estabilidad genética de la variedad Súper Chola, no influenciado por la bioestimulación.
- El uso de micorrizas potenció significativamente la productividad, alcanzando con el T1 el rendimiento máximo de 42,50 t/ha. Se validó la eficiencia de la simbiosis micorrízica al demostrar que el T2 (75% de fertilización + Micorriza) obtuvo un rendimiento de 37,42 t/ha, el cual fue estadísticamente igual al manejo convencional al 100% (T5). Además, la inoculación concentró la producción en la Categoría 1 (papa gruesa), superando las 21 t/ha en el tratamiento T1, lo que demuestra que la biotecnología permite reducir un 25% la carga química sin sacrificar la calidad comercial.
- El análisis financiero determinó que el tratamiento T1 es el más rentable, generando una utilidad neta de 9.123,33 USD/ha y la mayor relación Beneficio/Costo de 1,73. Por su parte, el tratamiento T2 (B/C de 1,63) superó en eficiencia económica al testigo convencional T5 (7.488,60 USD), demostrando que la inversión en inóculos de alta eficiencia como *Resid HC* no solo recupera la salud del suelo, sino que maximiza el retorno de inversión del agricultor al mejorar el perfil de categorías de la cosecha.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la adopción de la biotecnología micorrízica basada en *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* como una práctica estándar en el cultivo de papa Superchola. Específicamente, se sugiere implementar el esquema de fertilización del tratamiento T2 (75% de fertilización mineral + Micorriza), ya que

permite reducir en una cuarta parte el uso de fertilizantes químicos sintéticos, manteniendo rendimientos competitivos y mejorando la rentabilidad neta del agricultor.

- Para garantizar una simbiosis efectiva, se recomienda aplicar el inóculo micorrízico (Resid HC) en las etapas iniciales del cultivo (siembra o primer reabone), asegurando el contacto directo con el sistema radicular. Dado que los beneficios en el vigor de la planta se manifiestan de forma tardía (a partir de los 90 días), es fundamental no suspender el manejo agronómico complementario, permitiendo que la red de hifas se establezca plenamente para la fase de llenado de tubérculos.
- Se sugiere ampliar esta línea de investigación evaluando la respuesta de la micorriza bajo condiciones de estrés hídrico o heladas, fenómenos recurrentes en el cantón Huaca, para validar la capacidad del hongo de conferir resiliencia climática. Asimismo, sería valioso realizar análisis de colonización radicular y conteo de esporas post-cosecha para cuantificar la persistencia del microorganismo en los Andisoles y su efecto residual en cultivos de rotación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavides, G. (2025). Evaluación del rendimiento del cultivo de papa variedad Puca Shungo con la aplicación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro Experimental San Francisco [Trabajo de Integración Curricular, Universidad Politécnica Estatal del Carchi]. Repositorio Digital UPEC.
- Bertsch, F. (2009). Absorción de nutrientes por los cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Burbano, H. (2023). Fisiología de los suelos volcánicos andinos y su interacción con la microbiota rizosférica. *Revista Ecuatoriana de Suelos*, 12(2), 88-102.
- Centro Internacional de la Papa [CIP]. (2017). Ficha Técnica: Variedad Súper Chola. Inventario de Tecnologías e Información para el Cultivo de Papa en Ecuador.
- Centro Internacional de la Papa [CIP]. (2021). Ecofisiología del cultivo de papa en los Andes. CIP Publications.
- Chamorro, F., Potosí, S., & Hernández, G. (2021). Reducción de la fertilización fosfórica con el uso de biofertilizantes en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Superchola en suelos Andisoles del Carchi. *Cultivos Tropicales*, 42(2), 1-12.
- Condori, B., & Mamani, P. (2020). Efecto de la inoculación con *Glomus intraradices* en el rendimiento de dos variedades de papa nativa bajo condiciones de campo. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 25-36. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.530>
- Contreras-Pino, R., Castillo, C., & Mendoza, J. (2025). Effects of *Glomus iranicum* on Potato Growth and Nutrient Absorption under Greenhouse Conditions. *Agronomy*, 15(3), 405. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030405>
- Espinosa, J., & Molina, E. (2019). Fertilidad de Suelos y Manejo de la Nutrición de los Cultivos. International Plant Nutrition Institute [IPNI].
- Fernández, A., & Ruiz, P. (2024). Mecanismos de simbiosis de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en cultivos bajo estrés abiótico. *Journal of Applied Biotechnology*, 18(1), 14-29.
- García, L., & Martínez, R. (2024). Análisis de la eficiencia nutricional mediante el uso de hongos micorrízicos arbusculares en *Solanum tuberosum*. *Revista de Agronomía Sostenible*, 7(4), 210-225.

- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP]. (2021). Manual técnico del cultivo de papa para la Sierra ecuatoriana. Boletín Técnico No. 185.
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP]. (2023). Catálogo de variedades de papa del Ecuador. Programa Nacional de Raíces y Tubérculos.
- López, M., & Vaca, J. (2024). Biología del suelo y fertilidad en los ecosistemas de páramo cultivado. Universidad Central del Ecuador.
- Luna, J. C. (2022). Evaluación de dosis de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en la productividad y calidad de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra]. Repositorio Institucional PUCE-SI.
- Marschner, H. (2012). Mineral Nutrition of Higher Plants (3ra ed.). Academic Press.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2025). Informe situacional de la producción de papa en el Carchi: Ciclo productivo 2024-2025. Dirección de Información Agropecuaria.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2021). Guía de buenas prácticas agrícolas para la conservación del suelo y agua en la zona norte.
- Mora, E. (2018). Alternativas de bio-fertilización sobre indicadores productivos de *Solanum tuberosum* en Carchi [Trabajo de Integración Curricular, Universidad Politécnica Estatal del Carchi]. Repositorio Digital UPEC.
- Navas, G., & Herrera, S. (2023). Uso de bioestimulantes de última generación en la zona interandina del Ecuador. *Revista Científica Agropecuaria*, 9(1), 112-125.
- Peña, J. (2012). *Zonificación de la hacienda San Francisco y el aprendizaje de los estudiantes de la escuela de desarrollo integral agropecuario* [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Digital de la Universidad Técnica de Ambato. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/5475>
- Paspuel, M., & Rosero, J. (2022). Impacto económico de la fertilización química en pequeños productores de papa del cantón Huaca. *Revista de Ciencias Agropecuarias de la UPEC*, 6(1), 45-58.
- Pumisacho, M., & Sherwood, S. (2022). Guía técnica del cultivo de papa en Ecuador. INIAP-CIP.
- Quimbita, W. (2024). Evaluación financiera de sistemas de producción de papa con fertirriego en la sierra centro [Tesis de Ingeniería, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio ESPOCH.
- Ramírez, J. (2025). Dinámica de microorganismos benéficos en Andisoles con alta retención de fósforo. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 21(1), 5-18.

- Reyes, F., & Torres, D. (2023). La crisis de los fertilizantes y su impacto en la seguridad alimentaria andina. Informe Técnico FAO-Ecuador.
- Rivadeneira-Ruales, J. E., Cuesta-Subía, H. X., & Monteros-Altamirano, C. J. (2021). *Catálogo de variedades de papa del Ecuador* (2.ª ed.). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- Symborg. (2023). Manual técnico de Resid HC: *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* para cultivos intensivos. Symborg Biological Solutions.
- Tobar, A. (2024). Eficiencia agronómica de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* en el cultivo de nabo (*Brassica rapa* subsp. *rapa*) en la UPEC [Trabajo de Integración Curricular, Universidad Politécnica Estatal del Carchi]. Repositorio Digital UPEC.
- Vargas-Payares, C., et al. (2023). Impacto de los bioinsumos en la reducción de la huella de carbono en la agricultura de altura. *Revista Latinoamericana de Bioeconomía*, 4(2), 200-215.
- Yumisaca, F., Monteros, C., & Revelo, J. (2022). Manejo integrado y nutrición del cultivo de papa. INIAP, Publicación Miscelánea No. 204.

VII. ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI FOREIGN
AND NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAME: Viky Samanta Alba Pillajo				
DATE: Viernes, 16 de enero de 2026				
Topic: a "Evaluación del rendimiento del cultivo de papa (<i>Solanum tuberosum</i>) variedad Superchola con la aplicación de <i>Glomus iranicum</i> var. <i>tenuihypharum</i> a diferentes dosis de fertilización edáfica en el Centro Experimental San Francisco – UPEC"				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
De	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identify the type of text	The message has been communicated appropriately and identify the type of text	Some of the message has been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 <input type="checkbox"/>	GOOD: 1,5 <input type="checkbox"/>	AVERAGE: 1 <input type="checkbox"/>	LIMITED: 0,5 <input type="checkbox"/>
TOTAL/AVERAGE	9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED		TOTAL 9	



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL
CARCHI- FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES
CENTER**

**Informe sobre el Abstract de Artículo Científico
o Investigación.**

Autor: Viky Samanta Alba Pillajo

Fecha de recepción del abstract: 14 de enero de 2025

Fecha de entrega del informe: Viernes, 16 de enero de 2026

El presente informe validará la traducción del idioma español al inglés si alcanza un porcentaje de: 9 – 10 Excelente.

Si la traducción no está dentro de los parámetros de 9 – 10, el autor deberá realizar las observaciones presentadas en el ABSTRACT, para su posterior presentación y aprobación.

Observaciones:


Después de realizar la revisión del presente abstract, éste presenta una apropiada traducción sobre el tema planteado en el idioma Inglés. Según la rúbrica de evaluación de la traducción en Inglés, ésta alcanza un valor de 9; por lo cual se valida dicho trabajo.

Atentamente



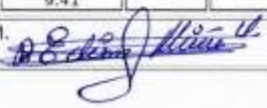
MA, Jairo Guevara
DIRECTOR DE CENTROS
ACADÉMICOS Y DE
FORMACIÓN
COMPLEMENTARIA


Anexo 2. Análisis de suelo del sitio del experimento



L A B O N O R T

LABORATORIOS NORTE
Av. Cristobal de Troya 4-93 y Jaime Roldos Ibarra - Ecuador cel. 0999591050

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS																																	
DATOS DE PROPIETARIO Nombre: Centro Experimental UPEC Ciudad: Huaca Teléfono: 0982501591 Fax:		DATOS DE LA PROPIEDAD Provincia: Carchi Cantón: Huaca Parroquia: Sitio: Centro Experimental UPEC																															
DATOS DEL LOTE Sitio: Centro Experimental UPEC Superficie: Número de Campo: Muestra #1 Cultivo Actual: A Cultivar:		DATOS DE LABORATORIO Nro Reporte.: 11762 Tipo de Análisis: Completo + T Muestra: Suelo, muestra 1 Fecha de Ingreso: Fecha de Reporte:																															
Nutriente	Valor	Unidad	INTERPRETACION																														
N	43.75	ppm																															
P	9.57	ppm																															
S	10.00	ppm																															
K	0.32	meq/100 ml																															
Ca	8.27	meq/100 ml																															
Mg	0.82	meq/100 ml																															
Zn	3.08	ppm																															
Cu	0.87	ppm																															
Fe	191.36	ppm																															
Mn	2.81	ppm																															
B	0.32	ppm																															
pH	5.05																																
Acidez Int. (Al+H)		meq/100 ml																															
Al		meq/100 ml																															
Na		meq/100 ml																															
Ce	0.160	mS/cm																															
MO	14.50	%																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Ca</th> <th>Mg</th> <th>Ca+Mg</th> <th>(meq/100ml)</th> <th>%</th> <th>ppm</th> <th colspan="3">(%)</th> <th>Clase Textural</th> </tr> <tr> <th>Mg</th> <th>K</th> <th>K</th> <th>Sum Bases</th> <th>NTot</th> <th>Cl</th> <th>Arena</th> <th>Limo</th> <th>Arcilla</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10.09</td> <td>2.56</td> <td>28.41</td> <td>9.41</td> <td></td> <td></td> <td>53.20</td> <td>36.00</td> <td>10.80</td> <td>Franco arenoso</td> </tr> </tbody> </table>				Ca	Mg	Ca+Mg	(meq/100ml)	%	ppm	(%)			Clase Textural	Mg	K	K	Sum Bases	NTot	Cl	Arena	Limo	Arcilla		10.09	2.56	28.41	9.41			53.20	36.00	10.80	Franco arenoso
Ca	Mg	Ca+Mg	(meq/100ml)	%	ppm	(%)			Clase Textural																								
Mg	K	K	Sum Bases	NTot	Cl	Arena	Limo	Arcilla																									
10.09	2.56	28.41	9.41			53.20	36.00	10.80	Franco arenoso																								
Dr. Quim. Edison M. Miño M. Responsable Laboratorio 																																	



Anexo 3. Script para realizar el análisis estadístico en R Studio de un DBCA

```
library(agricolae)
###DBCA
# Subir base de datos
dbca=read.delim("clipboard")
attach(dbca)
str(dbca)

summary(dbca)
boxplot(Peso.6 ~ Trat)

mod1= aov(Peso.6 ~ Bloq + Trat)
summary(mod1) # Bloq p-value = MENOR a 0,05 HAY DIFERENCIA ENTRE BLOQUES
# Trat p-value = MENOR a 0,05 HAY DIFERENCIA ENTRE TRATAMIENTOS
cv.model(mod1) # 24,59

#SUPUESTOS
shapiro.test(residuals(mod1)) #p-value debe ser mayor a 0,05
bartlett.test(Peso.6 ~ Trat) # p-value debe ser mayor a 0,05

library(agricolae)
HSD.test(mod1, "Trat", console=T) #PRUEBA DE TUKEY

B=HSD.test(mod1, "Trat", console=T)
bar.group(B$groups,ylim=c(0,26), col=2:9, ylab="Altura cm"
, main="Altura a los 15 días")
box()
```