

UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA AGRONOMÍA

TRABAJO DE TITULACIÓN COMO REQUISITO PREVIO

PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERA AGRÓNOMA

EVALUACIÓN DE ENMIENDAS CON HIDROGEL PARA LA RETENCIÓN GRADUAL DE HUMEDAD Y LIBERACIÓN DE NUTRIENTES HIDROSOLUBLES PARA CACAO EN VIVERO

AUTORA

ZAMBRANO BALCAZAR GERALDYN MELINA

TUTOR

ING. ESPINOZA MORÁN WINSTON, M.Sc.

GUAYAQUIL - ECUADOR

2026

UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA AGRONOMÍA

APROBACIÓN DEL TUTOR

El suscrito, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE ENMIENDAS CON HIDROGEL PARA LA RETENCIÓN GRADUAL DE HUMEDAD Y LIBERACIÓN DE NUTRIENTES HIDROSOLUBLES PARA CACAO EN VIVERO**., realizado por el estudiante **ZAMBRANO BALCAZAR GERALDYN MELINA**, con cédula de identidad N° **1316701471** de la carrera **AGRONOMÍA**, Unidad Académica Guayaquil, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos y legales exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto, se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

ING. WINSTON ESPINOZA MORÁN, M.Sc.
Firma del Tutor

Guayaquil, 07 de octubre del 2026

UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA AGRONOMÍA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: **"EVALUACIÓN DE ENMIENDAS CON HIDROGEL PARA LA RETENCIÓN GRADUAL DE HUMEDAD Y LIBERACIÓN DE NUTRIENTES HIDROSOLUBLES PARA CACAO EN VIVERO"**, realizado por el estudiante **ZAMBRANO BALCAZAR GERALDYN MELINA**, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

Ing. Tany Burgos Herrera, M.Sc.
PRESIDENTE

Ing. Henry Villón Leoro, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

Ing. Darlyn Amaya Márquez, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

Ing. Winston Espinoza Morán, M.Sc.
EXAMINADOR SUPLENTE

Guayaquil, 07 de octubre del 2026

DEDICATORIA

A Dios, porque él sostuvo mi camino. Cada victoria me recuerda que sus planes siempre son más grandes que los míos.

A mis padres, Antonio Zambrano Moreira y Elizabeth Balcazar Tandazo. Por confiar en que algún día este momento llegaría.

A la persona que fui, por resistir y no rendirse; y a la persona que seré porque este es solo el comienzo de todo lo que sueño.

Este trabajo lleva mi nombre, pero es el resultado del sacrificio, el amor y el esfuerzo de todas las personas que lo hicieron posible.

AGRADECIMIENTO

A Dios porque de él, y por él y para él, son todas las cosas. A él sea la gloria por los siglos, amén.

A mi familia, por creer en mí.

A mi novio, Oscar Zambrano Vásquez, por ser apoyo y refugio durante estos largos cinco años.

A mis amigos amados, Viviana Ronquillo, Ana Pachay, Roy Magallanes y Jader Peñafiel por hacer de esta etapa una experiencia con recuerdos inolvidables.

A cada uno de los docentes de la Universidad Agraria del Ecuador, quienes contribuyeron en mi formación profesional y humana. Honro y atesoro aquellos aprendizajes que llevaré siempre conmigo.

Hoy cierro una etapa invaluable en mi vida, pero el mérito de haber llegado hasta aquí pertenece a todos aquellos quienes le dieron sentido.

Autorización de Autoría Intelectual

Yo, **ZAMBRANO BALCAZAR GERALDYN MELINA**, en calidad de autor(a) del proyecto realizado, sobre "**EVALUACIÓN DE ENMIENDAS CON HIDROGEL PARA LA RETENCIÓN GRADUAL DE HUMEDAD Y LIBERACIÓN DE NUTRIENTES HIDROSOLUBLES PARA CACAO EN VIVERO**", para optar el título de **INGENIERO AGRÓNOMO**, por la presente autorizo a la **UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR**, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autora me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, 07 de octubre del 2020

ZAMBRANO BALCAZAR GERALDYN MELINA
C.I. 1316701471

RESUMEN

La limitada retención de humedad de los sustratos y la disponibilidad de nutrientes pueden afectar el desarrollo de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) durante la fase de vivero. Ante esta problemática, la presente investigación evaluó enmiendas con hidrogel para la retención gradual de humedad y liberación de nutrientes hidrosolubles. El ensayo fue desarrollado en Quevedo empleándose un diseño de bloques completos al azar, conformado por cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Se evaluó la incorporación de hidrogel solo o combinado con nitrógeno (N), fósforo (P) y sulfato de magnesio ($MgSO_4$). Los resultados mostraron que el T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presentó la mejor respuesta. A los 90 días después de la siembra (mantuvo 19.1% de humedad, frente a 10.8% del testigo, equivalente a 76.9% más humedad. Asimismo, registró 6% de estrés hídrico, mientras que el testigo alcanzó 68%, con diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0.05$). En la asimilación de nutrientes, T5 registró a los 90 DDS 0.85% de N, 1.15% de P y 0.60% de Mg, y alcanzó 42.7 cm de altura, frente a 28.3 cm del testigo ($p \leq 0.05$). El tratamiento T5 tuvo un costo de producción de $0.25 por plántula. Se concluye que la incorporación del hidrogel en combinación con fertilizantes hidrosolubles mejora la disponibilidad de agua y nutrientes en el sustrato, favoreció el desarrollo morfológico y fisiológico de las plántulas y contribuyó a la obtención de material vegetal de mayor calidad.

Palabras clave: *bioasimilación, disponibilidad, hidratación, retención.*

ABSTRACT

Limited substrate moisture retention and nutrient availability can negatively affect the development of cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings during the nursery stage. In response to this problem, the present study evaluated hydrogel amendments for gradual moisture retention and the release of water-soluble nutrients. The experiment was conducted in Quevedo using a randomized complete block design with five treatments and four replications. The incorporation of hydrogel alone and in combination with nitrogen (N), phosphorus (P), and magnesium sulfate ($MgSO_4$) was evaluated. The results showed that T5 (hydrogel + N + P + $MgSO_4$) produced the best performance. At 90 days after sowing (DAS), it maintained a substrate moisture content of 19.1%, compared with 10.8% in the control, representing a 76.9% increase in moisture retention. Likewise, T5 recorded only 6% water stress, whereas the control reached 68%, with significant differences according to Tukey's test ($p \leq 0.05$). Regarding nutrient assimilation, T5 achieved concentrations of 0.85% N, 1.15% P, and 0.60% Mg at 90 DAS and reached a mean seedling height of 42.7 cm, compared with 28.3 cm in the control ($p \leq 0.05$). The treatment had an estimated cost of US$0.25 per seedling. It is concluded that the incorporation of hydrogel combined with water-soluble fertilizers improves water and nutrient availability in the substrate, thereby promoting the morphological and physiological development of cacao seedlings and contributing to the production of higher-quality planting material.

Keywords: *bioassimilation, availability, hydration, moisture retention.*

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR ..... **ii**
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN ..... **iii**
DEDICATORIA ..... **iv**
AGRADECIMIENTO ..... **v**
Autorización de Autoría Intelectual ..... **vi**
RESUMEN ..... **vii**
ABSTRACT ..... **viii**
ÍNDICE GENERAL ..... **ix**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **xiii**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiv**
1. INTRODUCCIÓN **17**
1.1 Antecedentes del problema **17**
1.2 Planteamiento y formulación del problema **18**
1.2.1 Planteamiento del problema **18**
1.2.2 Formulación del problema **18**
1.3 Justificación de la investigación **18**
1.4 Delimitación de la investigación **19**
1.5 Objetivo general **19**
1.6 Objetivos específicos **19**
1.7 Hipótesis o idea para defender **19**
2. MARCO TEÓRICO **20**
2.1 Estado del arte **20**
2.2 Bases científicas y teóricas de la temática **22**
2.2.1 Morfología **22**
2.2.2 Descripción morfológica del cacao **22**
2.2.2.1. Semilla **22**
2.2.2.2. Raíz **22**
2.2.2.3. Tallo **22**
2.2.2.4. Hojas **23**
2.2.3 Fenología del cultivo **23**
2.2.3.1. Propagación **23**
2.2.3.2. Germinación **23**
2.2.4 Variedades **23**

2.2.4.1. Cacao criollo o dulce 23
2.2.4.2. Cacao Forastero o Amargo 24
2.2.4.3. Cacao Trinitario 24
2.2.4.4. Cacao Nacional de Ecuador 24
2.2.5 Requerimientos edafoclimáticos 24
2.2.5.1. Necesidad hídrica de la plántula de cacao en fase vivero 24
2.2.5.2. Temperatura 25
2.2.5.3. Luminosidad 25
2.2.5.4. Sombra 26
2.2.6 Requerimientos nutricionales 26
2.2.6.1. Fertilización 26
2.2.6.2. Macronutrientes 26
2.2.6.3. Nitrógeno 27
2.2.6.4. Fósforo 27
2.2.6.5. Micronutrientes 27
2.2.6.6. Sulfato de magnesio ($MgSO_4$) 28
2.2.7 Hidrogel 28
2.2.7.1. Característica física y química 28
2.2.7.2. Sensibilidad del pH 29
2.2.7.3. Influencia de la temperatura 29
2.2.7.4. Retención de humedad 29
2.2.8 Vivero 29
2.2.8.1. Definición 29
2.2.8.2. Siembra 29
2.2.9 Sustrato 30
2.2.9.1. Definición 30
2.2.9.2. Composición del sustrato 30
2.2.9.3. Preparación del sustrato 30
2.2.9.4. Capacidad de retención de nutrientes 31
2.2.9.5. Fibra de coco 31
2.2.9.6. Arena 31
2.2.9.7. Aserrín 32
2.2.9.8. Tamo de arroz 32
2.2.9.9. Turba comercial 32

2.2.9.10. Cáscara de cacao 32
2.3 Marco legal 32
2.3.1 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua……..... 32
3. MATERIALES Y MÉTODOS 34
3.1 Enfoque de la investigación 34
3.1.1 Tipo y alcance de la investigación 34
3.1.1.1. Investigación aplicada 34
3.1.1.2. Investigación documental 34
3.1.1.3. Investigación experimental 34
***3.1.2 Diseño de investigación* 34**
3.2 Metodología……..35
***3.2.1 Variables* 35**
3.2.1.1. Variable independiente 35
3.2.1.2. Variable dependiente 35
3.2.1.2.1. Contenido de humedad del sustrato (%). 35
3.2.1.2.2. Síntomas visuales de estrés hídrico. 35
3.2.1.2.3. pH del sustrato. 36
3.2.1.2.4. Altura de plántula (cm). 36
3.2.1.2.5. Diámetro del tallo (mm). 36
3.2.1.2.6. Longitud de raíz (cm). 36
3.2.1.2.7. Peso fresco de raíz (g). 36
3.2.1.2.8. Peso seco de raíz (g). 36
3.2.1.2.9. Vigorosidad de plántulas. 37
3.2.1.2.10. Asimilación de nutrientes (N, P, $MgSO_4$). 37
3.2.1.2.11. Costos de producción. 37
***3.2.2 Tratamientos* 37**
3.2.3 Diseño experimental 37
3.2.4 Recolección de datos 38
3.2.4.1. Recursos 38
3.2.4.1.1. Recursos bibliográficos. 38

3.2.4.1.2. Herramientas y equipos. 38

3.2.4.1.3. Recursos económicos. 39

3.2.4.2. Métodos y técnicas 39

3.2.4.2.1. Métodos de investigación. 39

3.2.4.2.2. Manejo del ensayo. 40

3.2.5 Análisis estadístico 41

3.2.5.1. Hipótesis estadística 41

4. RESULTADOS 42

4.1 Determinación de la eficacia de la mejor enmienda con hidrogel en la retención de humedad 42

4.1.1 Contenido de humedad del sustrato (%) 42

4.1.2 Síntomas visuales de estrés hídrico 43

4.1.3 pH del sustrato 44

4.2 Análisis de la interacción de los tratamientos con la mayor asimilación de elementos hidrosolubles a base de nitrógeno, fósforo y microelementos en el desarrollo de las plántulas 46

4.2.1 Altura de plántula (cm) 46

4.2.2 Diámetro del tallo (mm) 47

4.2.3 Longitud de raíz (cm) 48

4.2.4 Peso fresco y peso seco de raíz (g) 50

4.2.5 Vigorosidad de plántulas 51

4.2.6 Asimilación de nutrientes (N, P, $MgSO_4$) 52

4.3 Análisis de costos con la mejor propuesta de tratamiento 53

4.3.1 Costos de producción 53

5. DISCUSIÓN 54

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57

6.1 Conclusiones 57

6.2 Recomendaciones 57

BIBLIOGRAFÍA 59

ANEXOS 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala ordinal de marchitez (0 – 5). 35
Tabla 2. Descripción de tratamientos 37
Tabla 3. Descripción del diseño experimental en campo 38
Tabla 4. Análisis ANDEVA 38
Tabla 5. Recursos económicos 39
Tabla 6. Contenido de humedad del sustrato. 42
Tabla 7. Porcentaje de plántulas de cacao con síntomas de estrés hídrico. 44
Tabla 8. pH del sustrato a los 90 DDS. 45
Tabla 9. Altura de plántulas (cm). 46
Tabla 10. Diámetro del tallo de plántulas (mm). 48
Tabla 11. Longitud de raíz principal de plántulas (cm). 49
Tabla 12. Peso fresco y peso seco de la raíz de plántulas (g). 50
Tabla 13. Vigorosidad de plántulas. 51
Tabla 14. Concentración foliar de (N), (P) y ($MgSO_4$). 52
Tabla 15. Costo de insumos por tratamiento (USD). 53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de humedad del sustrato. 43
Figura 2. Plántulas de cacao con síntomas de estrés hídrico. 44
Figura 3. pH del sustrato a los 90 DDS. 45
Figura 4. Altura de plántulas (cm). 47
Figura 5. Diámetro del tallo de plántulas (mm). 48
Figura 6. Longitud de raíz principal de plántulas (cm). 49
Figura 7. Peso fresco y peso seco de la raíz de plántulas (g). 50
Figura 8. Vigorosidad de plántulas 52
Figura 9. Lugar donde se llevó a cabo el experimento 66
Figura 10. Croquis de campo 66
Figura 11. Toma de muestra de arena para análisis de laboratorio 67
Figura 12. Resultados del análisis de la arena utilizada como sustrato 67
Figura 13. Resultados del análisis de la arena utilizada como sustrato 68
Figura 14. Preparación de hidrogel 68
Figura 15. Hidrogel 69
Figura 16. Llenado de fundas de vivero con arena de rio 69
Figura 17. Preparación de semillas de cacao para germinación 70
Figura 18. Semillas germinadas 70
Figura 19. Fertilizantes hidrosolubles utilizados en los tratamientos 71
Figura 20. Preparación de la dosis de fertilización por tratamiento 71
Figura 21. Sulfato de magnesio 72
Figura 22. Urea 73
Figura 23. Fosfato diamónico 74
Figura 24. Vista general del ensayo a los 30 DDS 75
Figura 25. Seguimiento del ensayo y evaluación de plántulas 75
Figura 26. Aplicación de hidrogel y fertilizantes según los tratamientos 76
Figura 27. Plántulas seleccionadas aleatoriamente 76
Figura 28. Medición de altura y diámetro de las plántulas 77
Figura 29. Plántulas 60 días 77
Figura 30. Plántulas 90 días 78
Figura 31. Determinación del contenido de humedad del sustrato 78
Figura 32. Determinación del pH del sustrato durante el ensayo 79
Figura 33. Evaluación visual de síntomas de estrés hídrico en plántulas 79

Figura 34. Medición de la altura de la plántula de cacao a los 90 DDS 80
Figura 35. Medición de diámetro de la plántula de cacao a los 90 DDS 80
Figura 36. Medición de longitud de la raíz principal a los 90 DDS 81
Figura 37. Determinación del peso fresco de raíces 81
Figura 38. Secado de raíces para la determinación de biomasa seca 82
Figura 39. Recolección de muestras foliares para análisis de nutrientes 82
Figura 40. Vivero completo 83
Figura 41. Análisis foliar T1-60 83
Figura 42. Análisis T1-90 84
Figura 43. Análisis foliar T2-60 84
Figura 44. Análisis foliar T2-9 85
Figura 45. Análisis foliar T3-60 85
Figura 46. Análisis foliar T3-90 86
Figura 47. Análisis foliar T4-60 86
Figura 48. Análisis foliar T4-90 87
Figura 49. Análisis foliar T5-60 87
Figura 50. Análisis foliar T5-90 88
Figura 51. Análisis de varianza altura de planta 30 días 88
Figura 52. Análisis de varianza altura de planta 45 días 89
Figura 53. Análisis de varianza altura de planta 60 días 89
Figura 54. Análisis de varianza altura de planta 75 días 90
Figura 55. Análisis de varianza altura de planta 90 días 90
Figura 56. Diámetro del tallo 30 días 91
Figura 57. Diámetro del tallo 45 días 91
Figura 58. Diámetro del tallo 60 días 92
Figura 59. Diámetro del tallo 75 días 92
Figura 60. Diámetro del tallo 90 días 93
Figura 61. Estrés hídrico 93
Figura 62. Humedad 30 días 94
Figura 63. Humedad 45 días 94
Figura 64. Humedad 60 días 95
Figura 65. Humedad 75 días 95
Figura 66. Humedad 90 días 96
Figura 67. Longitud 96

Figura 68. Peso Fresco 97
Figura 69. Peso seco 97
Figura 70. Vigorosidad 30 días 98
Figura 71. Vigorosidad 60 días 98
Figura 72. Vigorosidad 90 días 99

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del problema

El cacao (*Theobroma cacao* L.) representa un componente clave en la economía rural, en especial para pequeños productores que, en su mayoría, no cuentan con conocimientos técnicos. Este cultivo es la base para la elaboración de diversos productos (Paz-Díaz et al., 2024).

En Ecuador, el cacao adquiere un valor simbólico y económico importante, y la variedad fina de aroma es la más sobresaliente. El cambio climático genera un déficit hídrico significativo en alrededor de 60% de las plantaciones de cacao del país, lo que afecta negativamente los procesos fisiológicos de la planta y reduce su productividad (Altamirano Arevalo y Rivera Poma, 2025; Barragán, 2017).

Durante la fase de vivero, los periodos extensos de falta de agua alteran la fisiología de la plántula de cacao, que genera un estrés hídrico en una etapa especialmente vulnerable. La capacidad de retención de humedad del sustrato permite que los nutrientes se movilicen hacia las raíces y favorezcan el crecimiento de estas. La humedad en el suelo depende del agua proveniente de lluvia o de sistemas de riego, de modo que el contenido de agua en el sustrato es crucial para mantener su funcionalidad (Cromtek, 2022; Moreno, 2009).

Ante este desafío, destaca el uso del hidrogel, un polímero superabsorbente en forma de partículas pequeñas que, al entrar en contacto con el agua, absorben de manera gradual grandes volúmenes de esta. Esta tecnología, al incorporarse al sustrato, puede absorber varias veces su peso en agua y, a medida que el sustrato se seca, libera el líquido en la zona radicular de las plantas. Su aplicación permite disminuir o complementar la frecuencia de riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua (Kaur et al., 2023).

En este contexto, la investigación evalúa la efectividad de las enmiendas con hidrogel en el vivero de cacao. Esta evaluación permite mitigar el estrés hídrico y mejorar la disponibilidad de nutrientes para las plántulas. Específicamente, se cuantifica el impacto y la influencia de estas enmiendas en el desarrollo morfológico y fisiológico de las plántulas de cacao, así como en la dinámica de liberación de nutrientes esenciales en el sustrato. Al comprender estos procesos, se busca fortalecer la resiliencia del cultivo frente a las variaciones climáticas.

1.2 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

El Ecuador enfrenta una deficiencia hídrica por factores ambientales y tecnológicos, lo que genera una mayor presión sobre los agricultores que luchan por mantener plántulas óptimas que cumplan las características de un material sano para su siembra en medio de condiciones controladas. Uno de los recursos más importantes para este proceso es el agua, lo que incrementa la posibilidad de una alarmante crisis económica; por ende, la disponibilidad de este recurso se ve cada vez más limitada, de acuerdo con el tipo de sustrato.

El cultivo de cacao se desarrolla en suelos donde la disponibilidad de agua y nutrientes es clave para su crecimiento y productividad. Sin embargo, la lixiviación rápida de fertilizantes hidrosolubles y la baja capacidad de retención de humedad en algunos suelos limitan la disponibilidad de nutrientes para la planta.

Integrar el hidrogel con fertilizantes edáficos hidrosolubles podría permitir un suministro gradual de agua y nutrientes y reducir las pérdidas por lixiviación, lo que mejoraría la eficiencia de absorción.

El propósito general de este proyecto es evaluar las enmiendas con hidrogel para la retención gradual de humedad y la liberación de nutrientes hidrosolubles en plántulas de cacao en fase de vivero, con el fin de aportar al rendimiento nutricional del sustrato tratado con esta tecnología.

1.1.2 Formulación del problema

¿De qué manera las enmiendas con hidrogel influyen en la retención gradual de humedad y la liberación de nutrientes hidrosolubles en el sustrato, potenciando su disponibilidad para las plántulas de cacao en fase de vivero?

1.2 Justificación de la investigación

La presente investigación implementa una nueva alternativa para el agricultor mediante la reducción del uso de agua, con un incremento de la capacidad de retención de humedad disponible en el sustrato con la aplicación del hidrogel, lo que a su vez favorece la asimilación de macro y micronutrientes esenciales.

1.3 Delimitación de la investigación

- **Espacio:** El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Quevedo, en la provincia de Los Ríos. Sus coordenadas geográficas son 1°03’57”S 79°28’54”W.
- **Tiempo:** La investigación tuvo una duración de tres meses.
- **Población:** Trabajo dirigido a productores agrícolas de cacao, estudiantes de la Universidad Agraria del Ecuador y comunidades rurales vinculadas a la zona.

1.4 Objetivo general

Evaluar enmiendas con hidrogel para la retención gradual de humedad y liberación de nutrientes hidrosolubles en plántulas de cacao en fase de vivero.

1.5 Objetivos específicos

- Determinar la eficacia de la mejor enmienda con hidrogel en la retención de humedad.
- Analizar la interacción de los tratamientos con la mayor asimilación de elementos hidrosolubles a base de nitrógeno, fósforo y microelementos en el desarrollo de las plántulas.
- Realizar el análisis de costos con la mejor propuesta de tratamiento.

1.6 Hipótesis o idea para defender

La incorporación del hidrogel junto con elementos edáficos hidrosolubles mejorará significativamente la retención de humedad y permitirá una liberación gradual de los nutrientes esenciales en el sustrato para las plántulas de cacao.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

El uso de hidrogeles en la agricultura constituye una alternativa para mejorar la disponibilidad de agua en el sustrato, en especial, en medio con limitada capacidad de retención hídrica. Patra et al. (2022) señalan que el hidrogel retiene y libera agua, facilita la solubilización y absorción de nutrientes al mejorar su disponibilidad hídrica. Este mecanismo mejora la estructura del sustrato al favorecer las propiedades del medio radicular óptimo para el desarrollo vegetal.

Esta capacidad adquiere especial importancia en medios arenosos, donde la incorporación de polímeros superabsorbentes en concentraciones de 0.3%, 0.6% y 1.0% (p/p) incrementó el agua disponible para las plantas de 0.005 g g^{-1}, sin polímero, a 0.06, 0.20 y 0.28 g g^{-1}, respectivamente (Banedjschafie y Durner, 2015).

La respuesta de estos polímeros también está condicionada por las propiedades del suelo, debido a que su incorporación modifica la retención y disponibilidad de agua en diferente magnitud según las características del medio (Narjary et al., 2012).

La aplicación de hidrogel en cacao logra una tasa de supervivencia superior al 95% a los tres meses, lo que permite que las plantas sobrevivan para el injerto. Las plántulas muestran un mayor contenido de clorofila y hojas de mayor tamaño, lo que demuestra una mejor respuesta fisiológica y crecimiento durante el período seco y cálido (Tee et al., 2018). La importancia de mantener una adecuada disponibilidad hídrica durante esta etapa también se observa al someter plántulas de cacao a condiciones de déficit de agua. En evaluaciones realizadas con 11 genotipos bajo 25% y 100% de agua disponible, la menor disponibilidad redujo el diámetro del tallo de 0.65 a 0.49 cm, el área foliar de 114.03 a 65.07 cm^2, el volumen radicular de 4.59 a 3.12 mL y la biomasa seca de la parte aérea de 5.27 a 1.90 g (Susilo et al., 2019). De igual manera, evaluaciones realizadas en plántulas de cacao de tres meses sometidas a cuatro niveles de agua disponible registraron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) en su respuesta fisiológica relacionadas con el contenido de agua del suelo (García Lozano y Moreno Fonseca, 2016).

Asimismo, el uso de sustratos ejerce un efecto positivo en parámetros fisiológicos y morfológicos clave durante la fase de germinación y desarrollo temprano de las plántulas. Los resultados al utilizar suelo agrícola, arena de río y

humus indican que este tipo de sustrato promueve incrementos significativos en la longitud radicular, mayor altura de plántula, aumento en el número de hojas verdaderas y diámetros de tallo más adecuados para procesos de injertación.

Estos efectos estarían asociados a dos características fundamentales del sustrato: un contenido óptimo de materia orgánica, que mejora las propiedades fisicoquímicas del medio, y la incorporación de arena de río como componente inorgánico, la cual favorece la aireación y estructuración del medio, lo que facilita así el desarrollo del sistema radicular (Zamora Llanos y Pincay Menéndez, 2024).

El uso de macro y microelementos en CCN51 evidencia la importancia de aplicar fertilizantes que incluyan nitrógeno, fósforo, azufre, manganeso, etc., ya que cada uno cumple funciones esenciales en el crecimiento y desarrollo de la planta, lo que se refleja en un incremento del rendimiento de 53.71% (Ludeña, 2013). La respuesta a la fertilización también puede ser evaluada mediante la concentración de nutrientes en los tejidos vegetales. En estudios con cinco niveles de fertilización NPK correspondientes a 0%, 25%, 50%, 75% y 100%, se registraron variaciones en las concentraciones foliares de 11 nutrientes, entre ellos N, P y Mg, de acuerdo con el nivel de fertilización aplicado (Puentes-Páramo et al., 2016). Asimismo, la aplicación de fuentes orgánicas e inorgánicas de nutrientes en cacao joven produjo diferencias en la absorción nutricional y en las variables relacionadas con el crecimiento de las plantas (Dogbatse et al., 2021).

Durante la fase de vivero, la disponibilidad equilibrada de nutrientes también influye sobre las características morfológicas de las plántulas. La evaluación de cinco tratamientos de fertilización con N, P, K, Ca y Mg registró una altura de 61.53 cm con la aplicación de 7 g de Ca y 3.2 g de Mg, mientras que las plántulas sin fertilización alcanzaron 45.40 cm (Quiñones-Cabezas et al., 2024). Por otra parte, al evaluar nueve combinaciones de NPK y compost en plántulas de cacao cultivadas en bolsas, la combinación de 7 g de NPK y 166 g de compost por plántula presentó la mayor respuesta de crecimiento entre los tratamientos estudiados (Prasatyio et al., 2025).

Vargas Guillén et al. (2024) evaluaron tres tipos de sustratos y dos fórmulas de fertilizantes en el crecimiento de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en vivero. Los autores determinaron que la incorporación de NPK al suelo franco mejoró significativamente el crecimiento y desarrollo de las plántulas, con respuestas favorables en variables como altura, diámetro del tallo, longitud radicular

y vigor. Además, el análisis económico evidenció una relación beneficio/costo de $1.57 en uno de los tratamientos evaluados, lo que demuestra la importancia de considerar conjuntamente la respuesta agronómica y económica al seleccionar alternativas de manejo durante la fase de vivero.

2.2 Bases científicas y teóricas de la temática

2.2.1 Morfología

La morfología es la disciplina encargada del estudio de la estructura de un organismo o de la descripción y comparación entre organismos. Esto incluye aspectos de la apariencia externa (forma, color, estructura, entre otros.), así como de la estructura de los órganos vegetales, como raíces, tallos, hojas, la inflorescencias, frutos y semillas (Ramírez Chamorro et al., 2020).

2.2.2 Descripción morfológica del cacao

2.2.2.1. Semilla

Al realizar una buena elección de semillas, se escogen las de mayor tamaño y vigor, semillas del tamaño de una almendra, de color chocolate o purpúreo, de dos a tres centímetros de largo, y de sabor amargo, y que se encuentran, por lo general, en el centro de la mazorca.

Las semillas viables deben superar 1.0-1.5 g de peso y ≥25 mm de longitud, y las ubicadas en el centro de la mazorca son las óptimas (28-35 mm; 1.2-1.8 g), mientras que las de los extremos son menores (<22 mm; <0.8 g) y se descartan por su bajo vigor. La semilla germina de forma epigea, entre tres y siete días después de la siembra (Dávila, 2021).

2.2.2.2. Raíz

En plántulas de cacao en fase de vivero, de tres a cuatro días después de la siembra de las semillas, se observa normalmente la emergencia de raíces primarias o pivotantes blanquecinas, las que, después de 15 a 20 días, alcanzan una profundidad de 10 a 15 cm, a los 45 días alcanzan aproximadamente 21cm; a los 60 días presentan raíces de aproximadamente 29 cm y, a los 75 días, una longitud de 33 cm. Además, el sistema radicular concentra aproximadamente el 70% de las raíces absorbentes en los primeros 20 cm del suelo. En plantas adultas, alcanzan entre 1.5 y 2.5 m en suelos profundos (Montes Mosquera, 2016).

2.2.2.3. Tallo

El tallo constituye el eje principal de la planta, sobre el cual se desarrollan las ramas, hojas, flores y frutos; un crecimiento vertical inicial de las plantas, que,

expresado en centímetros, a los 45 días oscila entre 17.7 y 18.6 cm y, a los 60 días, oscila entre 19.5 y 20.8 cm. Después de los 16 meses, va seguido de una ramificación en horquetas con tres a cinco ramas laterales a 45°-60°. Los chupones basales crecen 2-3 cm/semana y deben podarse al alcanzar 15-20 cm (Merchán Pincay, 2022).

2.2.2.4. Hojas

Las hojas maduran en fases de siete a 10 días, con un tamaño de 20 a 35 cm durante un periodo de 12-14 meses antes de la senescencia. En plántulas de vivero se esperan hojas de 4.4 a 5 cm a los 30 días, 7 a 8 cm a los 50 días y de 10 a 12 cm a los 75 días.

En la injertación mediante yema terminal o púa, es necesario retirar las hojas ubicadas en la parte inferior del patrón y retirar el material de plástico que mantiene la unión entre ambos tejidos, con 20 días de anticipación a su ubicación definitiva.

Entre los tres a cuatro meses posteriores a la injertación, los injertos alcanzan un desarrollo óptimo, evidenciado por la presencia de al menos dos pares de hojas verdaderas y una altura que oscila entre 20 y 40 cm. En esta etapa, se encuentran aptos para el trasplante definitivo.

2.2.3 Fenología del cultivo

2.2.3.1. Propagación

En el cultivo de cacao existen dos maneras en la que se puede dar la reproducción: de forma sexual que es mediante semillas, y la asexual, que se da mediate estacas, codos y yemas.

Generalmente la forma más usada es la sexual, gracias a su facilidad para reproducirse mediante el uso de árboles con calidad de material vegetativo sano y vigoroso (Matamoros Villon, 2024).

2.2.3.2. Germinación

Las raíces primarias surgen a los tres a cuatro días después de la siembra, y alcanzan una longitud de 10 a 15 cm en un periodo de 15 a 20 días. Las plántulas se desarrollan inicialmente sin ramificaciones hasta alcanzar uno o dos metros de altura, posteriormente, comienzan a formar verticilos y chupones (Arteaga, 2019).

2.2.4 Variedades

2.2.4.1. Cacao criollo o dulce

Hace más de 3 000 años, las variedades de cacao criollo eran las más extendidas en cultivo. Estas plantas suelen ser delgadas, con frutos de piel fina,

superficie marcada y un tono rojizo. El Criollo muestra indicios de consanguinidad, lo que resulta en menor productividad y mayor susceptibilidad a enfermedades. En los países de América donde se habla español, la palabra "criollo" se usa para denominar tanto a las variedades autóctonas como a otros tipos tradicionales.

Su producción a escala comercial se centra en sus regiones de origen, como Venezuela, México, Nicaragua, Guatemala y Colombia, y representa entre el 5% y el 10% de la producción mundial de cacao (Castro-Alayo et al., 2019).

2.2.4.2. Cacao Forastero o Amargo

Proveniente de América, esta variedad es la más extendida en las zonas productoras de cacao de África y Brasil. Sus frutos se distinguen por tener una corteza dura y leñosa, con una superficie bastante lisa y semillas aplanadas de tonalidad morada y sabor amargo. Entre sus variedades más destacadas se encuentran Cundeamor, Amelonado, Sambito, Calabacillo y Angolet (Yang et al., 2024).

2.2.4.3. Cacao Trinitario

Esta variedad surge del cruce de la variedad Criollo y Forastero, las mazorcas por lo general son de muchas formas y colores; las semillas son más grandes que la de las otras variedades; las plantas son fuertes, de tronco grueso y hojas grandes. Actualmente es la variedad más cultivada en el mundo (Defaz Quilumba, 2016).

2.2.4.4. Cacao Nacional de Ecuador

En el estado de vivero, la morfología del Cacao Nacional de Ecuador (*Theobroma cacao* L. variedad Nacional) se caracteriza por la propagación clonal de materiales élite mediante injertos, derivados de la selección de árboles superiores identificados por su alto rendimiento y tolerancia a enfermedades como la escoba de bruja y la monilla.

Las plantas presentan diversidad genética agrupada en nueve grupos moleculares, lo que influye en características como el desarrollo radicular, la estructura foliar y la robustez del tallo durante la fase inicial (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP], s. f.).

2.2.5 Requerimientos edafoclimáticos

2.2.5.1. Necesidad hídrica de la plántula de cacao en fase vivero

En vivero, las plántulas de Cacao Nacional requieren un riego constante y preciso para mantener la humedad del sustrato sin saturarlo. La demanda hídrica

es alta debido a su rápido crecimiento y a su sistema radicular inicial superficial, por lo que requieren riegos diarios o cada 48 horas, en función de la temperatura y la humedad ambiental. El volumen óptimo oscila entre 250 y 300 mL/planta/día en condiciones ecuatorianas típicas (Villasmil Villasmil et al., 2022).

La disponibilidad de agua en el sustrato condiciona directamente la respuesta fisiológica de las plántulas de cacao durante la fase de vivero. El déficit hídrico disminuye el potencial hídrico foliar y promueve el cierre estomático, lo que altera el intercambio gaseoso que limita la fotosíntesis y el crecimiento. García Lozano y Moreno Fonseca (2016), al evaluar plántulas de cacao de tres meses bajo cuatro niveles de agua disponible y cinco repeticiones, encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) relacionadas con el contenido de agua del suelo, lo que demuestra la sensibilidad fisiológica del cacao frente a condiciones de déficit hídrico.

2.2.5.2. Temperatura

El Cacao Nacional necesita de una temperatura idónea de entre 21 °C, como temperatura mínima, y 28 °C, como temperatura máxima. Es óptimo para la fotosíntesis, la elongación celular y la formación de nuevas hojas. Las temperaturas nocturnas inferiores a 18 °C ralentizan significativamente el metabolismo y el crecimiento, lo que aumenta la susceptibilidad a enfermedades. Por el contrario, valores superiores a 32 °C incrementan la transpiración y el estrés hídrico, lo que causa quemaduras foliares y reducción del área foliar (Paredes Arce, 2003).

2.2.5.3. Luminosidad

Las plántulas de Cacao Nacional en vivero necesitan luz difusa y moderada (800-1 200 lux inicialmente), equivalente al 30-50% de sombra. La exposición directa al sol tropical intenso (>50 000 lux) causa fotoinhibición, quemaduras foliares y deshidratación acelerada. Sin embargo, una luminosidad insuficiente (<500 lux) induce etiolamiento (tallos débiles y alargados), hojas cloróticas y menor acumulación de carbohidratos.

Se emplean mallas de sombreado (raschel 35-50%) para filtrar la radiación, con un ajuste progresivo según el desarrollo: mayor sombra los primeros 15 días tras el injerto, con una reducción al 30% al endurecerse las hojas. Esta luz filtrada estimula un crecimiento compacto y una fotosíntesis eficiente sin daño fotooxidativo (Leiva-Rojas et al., 2024).

2.2.5.4. Sombra

El uso de sombra artificial es crítico en vivero para simular el ambiente umbrófilo natural del cacao. Se implementa mediante mallas sombreadoras (comúnmente raschel al 50% durante la etapa inicial de brotación y formación de raíces del injerto), los cuales protegen a las plántulas del estrés por exceso de radiación solar, viento y evaporación.

Esta cobertura reduce la temperatura bajo ella en 2 - 5 °C y mantiene mayor humedad relativa. A medida que las plantas desarrollan entre 3 y 4 hojas verdaderas (4 y 6 semanas), la sombra se reduce gradualmente al 30-35% para aclimatar las plántulas a condiciones de campo (García Macías, 2021).

2.2.6 Requerimientos nutricionales

2.2.6.1. Fertilización

La fertilización de las plantas de cacao en vivero se efectúa de forma continua, de acuerdo con los requerimientos nutricionales que se evidencien durante la etapa de desarrollo. En la etapa de patronaje, estas labores se realizan después de los 30 días de la siembra y se mantienen hasta 15 días antes de la injertación, cuando las plantas tienen aproximadamente entre 60 y 80 días de desarrollo. Luego de la injertación, se aconseja aplicar fertilizante a los 30 días y nuevamente ocho días antes del establecimiento, etapa en la que las plantas alcanzan entre 180 y 210 días de desarrollo en vivero.

Las deficiencias de nutrientes pueden identificarse principalmente por la presencia de clorosis en las hojas y alteraciones o deformaciones en sus bordes. Por esta razón, la fertilización debe adecuarse a los requerimientos de cada planta, para garantizar un crecimiento vigoroso y evitar presencia de deficiencias importantes durante la primera fase (Enríquez Jaramillo et al., 2018).

2.2.6.2. Macronutrientes

Los macronutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio) son determinantes en el desarrollo de plántulas de cacao. Su disponibilidad influye directamente en variables morfológicas como altura, diámetro del tallo y producción foliar, por lo que se requiere un balance preciso para optimizar la calidad del material vegetal (Meilani et al., 2023).

La respuesta del cacao a la fertilización no depende únicamente de la cantidad de nutrientes aplicada, sino también de su disponibilidad y absorción por la planta. La concentración de nutrientes en los tejidos vegetales permite evaluar el

estado nutricional y relacionarlo con la respuesta de crecimiento. Dogbatse et al. (2021), al evaluar seis tratamientos de fertilización orgánica e inorgánica en cacao joven, determinaron que el manejo de la fertilización influye en la absorción de nutrientes y en el crecimiento de las plantas. Los autores señalan que la combinación de fuentes nutricionales puede mejorar la disponibilidad y absorción de elementos esenciales, lo que demuestra la importancia de considerar conjuntamente el estado nutricional y las variables de crecimiento del cacao.

2.2.6.3. Nitrógeno

El nitrógeno es crucial para el crecimiento en vivero, ya que incrementa la altura de las plantas y el diámetro del tallo. Dosis entre 493 y 560 kg ha^{-1} han demostrado maximizar la productividad; sin embargo, deben ajustarse según las condiciones locales para evitar estrés o quemaduras foliares.

La deficiencia de N en las plantas disminuye el crecimiento, las hojas son pequeñas y tampoco se puede sintetizar la clorofila; como consecuencia, aparece clorosis (hojas de color amarillo). La clorosis empieza en las hojas de mayor edad o inferiores, las cuales pueden llegar a caerse. Si la carencia es severa, puede aparecer clorosis en las hojas más jóvenes (Lumactud et al., 2023).

2.2.6.4. Fósforo

Su aplicación en viveros suele integrarse en fórmulas balanceadas o mediante fertilizantes fosfatados para asegurar su disponibilidad en sustratos. El fosfato diamónico (DAP) es una fuente concentrada de nitrógeno (18%) y fósforo (46%), útil para corregir deficiencias en las etapas iniciales del cacao. Su solubilidad facilita la absorción en viveros; sin embargo, requiere aplicación controlada para evitar desbalances nutricionales o fitotoxicidad.

Acelera la madurez y se relaciona con la formación de semillas. Su deficiencia se caracteriza por una reducción del crecimiento, hojas pequeñas, marchitas y necróticas, raíces cortas, delgadas y poco profundas. Finalmente, se produce una caída prematura de estas (Wang et al., 2022).

2.2.6.5. Micronutrientes

Hierro, zinc, manganeso y cobre son micronutrientes esenciales que participan en la síntesis de clorofila y enzimas. En viveros, se aplican vía foliar o en el sustrato para prevenir la clorosis y las malformaciones, especialmente en suelos alcalinos o con alta retención de arcilla (Zewide y Sherefu, 2021).

En el cultivo de cacao, el suministro equilibrado de macronutrientes es fundamental durante las primeras etapas de desarrollo, debido a que las plantas dependen tanto de la cantidad aplicada como de la disponibilidad de los elementos en el medio de crecimiento. El nitrógeno participa principalmente en el crecimiento vegetativo y la formación de tejidos; el fósforo interviene en procesos energéticos y en el desarrollo radicular, mientras que el magnesio constituye un elemento esencial para la formación de clorofila y diferentes procesos metabólicos. Por ello, el manejo nutricional debe considerar la interacción entre los nutrientes y las condiciones del sustrato, ya que una fertilización equilibrada puede favorecer variables morfológicas relacionadas con la calidad de las plántulas de cacao (Quiñones-Cabezas et al., 2024).

2.2.6.6. Sulfato de magnesio ($MgSO_4$)

Este fertilizante (25% MgO y 20% S) corrige eficazmente la clorosis en plántulas al estimular la síntesis de clorofila. Su alta solubilidad permite aplicaciones foliares o al suelo durante las fases de máximo crecimiento, lo que mejora la fotosíntesis y el metabolismo del fósforo y del potasio (Soleimanpour et al., 2022).

2.2.7 Hidrogel

El hidrogel es un polímero superabsorbente capaz de suministrar grandes cantidades de agua al sustrato. Es un proceso con diferentes velocidades que depende del grado de polimerización de las materias primas (Maksimova et al., 2023).

Los hidrogeles utilizados en agricultura son redes poliméricas con capacidad de absorber cantidades considerables de agua y conservarla dentro de su estructura sin disolverse. Al incorporarse al sustrato, actúan como reservorios temporales de agua, la cual puede ser liberada gradualmente conforme disminuye la humedad del medio. Su aplicación puede mejorar la disponibilidad hídrica en la zona radicular, disminuir las pérdidas de agua y aumentar el intervalo entre riegos, por lo que resulta particularmente útil en medios con baja capacidad de retención hídrica (Abdallah, 2019).

2.2.7.1. Característica física y química

Los hidrogeles son compuestos poliméricos formados por una red de cadenas de polímeros que se encuentran distribuidas en un entorno acuoso. Por su alta afinidad por el agua y a su estructura porosa, este material tiene la capacidad

de absorber y almacenar grandes volúmenes de agua en su estructura interna (Maksimova et al., 2023).

2.2.7.2. Sensibilidad del pH

Se evalúa el pH con un análisis de suelo (prueba de pH en pasta saturada). Se toman muestras del sustrato, se mezclan con agua destilada y se utiliza un pH-metro digital. El rango ideal es 5.5 y 6.5. Si el pH está fuera de ese rango, se corrige con azufre (para disminuir el pH) o con cal agrícola (para aumentarlo) (Hendi et al., 2020).

2.2.7.3. Influencia de la temperatura

La temperatura se mide con un termómetro digital de sonda insertado a 10 cm de profundidad. El intervalo óptimo para plántulas de cacao es entre 25 y 28 °C. Temperaturas superiores a 32 °C causan estrés hídrico, mientras que temperaturas inferiores a 20 °C ralentizan el crecimiento. Para estabilizar la temperatura, se recomienda utilizar mallas de sombreo (30%-50%) y realizar riegos matutinos (Xian y Webber, 2020).

2.2.7.4. Retención de humedad

La retención de humedad se determina mediante el método gravimétrico: se pesa el hidrogel seco, se satura con agua, se escurre y se vuelva a pesar. El valor ideal es entre 15% y 20% del peso del sustrato. Este nivel mantiene la humedad sin provocar asfixia radicular. Un exceso (>25%) favorece la aparición de pudriciones, mientras que, un valor inferior al 10% incrementa la frecuencia de riego (Li et al., 2020).

2.2.8 Vivero

2.2.8.1. Definición

El vivero se considera como un área delimitada de terreno, debidamente preparada, con el propósito fundamental de obtener la multiplicación y producción de plantas resistentes, libres de enfermedades y con características fenotípicas y genotípicas únicas, hasta el momento en que se encuentren en condiciones para ser plantadas en el sitio definitivo (Rodríguez Silva, 2013).

2.2.8.2. Siembra

Para una hectárea, se requieren aproximadamente 750 fundas negras con orificios que permitan el drenaje y un tamaño mínimo de 15 x 20 cm (6 x 8 pulgadas). Se seleccionan las mejores semillas de las mazorcas de cacao Nacional para luego sembrarlas a 2 cm de profundidad en sus respectivas fundas de polietileno, con el

embrión orientado hacia abajo para evitar problemas de germinación. En el caso de superficies extensas, es recomendable establecer semilleros próximos al lugar destinado para la plantación definitiva. El vivero debe protegerse de vientos intensos y cercarse adecuadamente para evitar daños (Villasmil Villasmil et al., 2022).

2.2.9 Sustrato

2.2.9.1. Definición

Los sustratos son mezclas de materiales activos o inertes que sirven como medio para el crecimiento de plantas en recipientes, con un pH óptimo es de 6 como mínimo y 7 como máximo. Están compuestos por partículas minerales y rocosas, y pueden incluir organismos vivos o muertos. Su elección influye en la velocidad de germinación de las semillas. Además de brindar soporte a las raíces, pueden o no participar en la nutrición mineral de la planta (Alcoverro, 2009).

2.2.9.2. Composición del sustrato

La elección inadecuada del sustrato en viveros de cacao ocasiona fallas en la germinación y en el crecimiento de las plántulas, además de una limitada retención de agua y un escaso contenido nutricional. Por esta razón, es común que los productores manifiesten insatisfacción con los sustratos comerciales, que suelen tener un costo elevado y no cumplir con los resultados esperados (Defaz Quilumba, 2016).

2.2.9.3. Preparación del sustrato

La tierra para la preparación del sustrato debe someterse a una desinfección como medida preventiva; el método más usado y económico para esta labor es la solarización con volteos diarios durante un mínimo de ocho días para eliminar semillas de malezas y patógenos presentes en el suelo.

Se recomienda incorporar una enmienda o correctivo, como la cal, cuando el pH del suelo empleado sea inferior a 5.5. Después de acondicionar el sustrato, este debe tamizarse con una malla con perforaciones de 0.5 cm, con el propósito de retirar piedras y otros materiales que puedan dificultar el llenado de las bolsas. Asimismo, se aconseja la desinfección del sustrato con una solución de oxicloruro de cobre, aplicada en una dosis de 15 g/L de agua, hasta humedecerlo completamente y alcanzar la capacidad de campo.

Para el embolsado se usan fundas de polipropileno de calibre 2.5, de 30 cm de largo por 15 cm de ancho y perforaciones en la parte inferior. Este tipo de

bolsas es recomendado debido a que proporciona condiciones favorables para el correcto desarrollo radicular.

El llenado de las bolsas debe realizarse de manera uniforme y completa, sin dejar vacíos en su interior. Una vez preparadas, las bolsas se colocan en hileras de máximo cuatro unidades de ancho, con una extensión aproximada de 60 cm, y una longitud comprendida entre 10 y 15 m, de acuerdo con el tamaño del vivero y el manejo agronómico requerido.

2.2.9.4. Capacidad de retención de nutrientes

El sustrato debe retener nutrientes, que evite la lixiviación y liberándolos gradualmente. La capacidad de retención puede evaluarse mediante un análisis foliar; si las hojas nuevas muestran clorosis (amarillamiento), esto indica una posible deficiencia nutricional. Los sustratos con entre 20% y 30% de materia orgánica y arcillas presentan una mejor capacidad de retención de nutrientes (Dey et al., 2023).

2.2.9.5. Fibra de coco

La fibra de coco se utiliza como un sustrato de buena porosidad. Al ser renovable y abundante, favorece al vigor de las raíces y es capaz de retener altos niveles de humedad, al drenar el exceso de agua y mantener una adecuada relación agua – aire (Fertilab, 2025).

2.2.9.6. Arena

Las arenas de río son las más recomendadas para sustratos, especialmente si tienen un tamaño de partícula entre 0.5 y 2 mm. Aunque la arena es económica y mejora la estructura del sustrato, es químicamente inerte, baja en nutrientes y retiene poca humedad. Debe lavarse y tamizarse antes de usar para eliminar arcilla, limo y contaminantes, y es útil en mezclas con turba y compost para mejorar el drenaje y el enraizamiento de esquejes (Velalcázar Rengifo, 2021).

Los medios arenosos presentan una elevada proporción de macroporos, característica que favorece el drenaje y la aireación, pero limita su capacidad para almacenar agua disponible para las plantas. Debido al tamaño relativamente grande de sus partículas y a su reducida superficie específica, el agua puede desplazarse rápidamente fuera de la zona radicular. En estas condiciones, la incorporación de polímeros superabsorbentes constituye una alternativa para modificar las propiedades hídricas del medio, debido a que el hidrogel absorbe agua

durante los periodos de mayor disponibilidad y puede liberarla posteriormente cuando disminuye el contenido hídrico del sustrato (Banedjschafie y Durner, 2015).

2.2.9.7. Aserrín

El aserrín es un residuo resultante del proceso de aserrado de la madera, el cual se caracteriza por tener una consistencia firme y una densidad ligera. La principal ventaja del aserrín es su bajo costo; sin embargo, al ser un material orgánico entra en descomposición, lo que reduce su vida útil como sustrato, la capacidad de retención de agua es de baja a media, pero su capacidad de aireación suele ser adecuada (Daza Triana y Salguero Abril, 2015).

2.2.9.8. Tamo de arroz

La cascarilla de arroz es ampliamente utilizada como sustrato. Para aumentar su capacidad de retener humedad, se aconseja realizar una quema parcial del material. Asimismo, se distingue por ser un sustrato orgánico de difícil degradación y lenta descomposición, además de ser liviano, presentar baja densidad y alto volumen, y proporcionar un buen drenaje y una adecuada aireación (Defaz Quilumba, 2016).

2.2.9.9. Turba comercial

La turba comercial es un sustrato ampliamente usado debido a sus propiedades físicas y químicas, y su capacidad de retener mejor el agua y aire. Se origina a partir de la descomposición lenta de restos vegetales en ambientes con escasez de oxígeno y exceso de humedad, lo que permite mantener su estructura y retención de minerales (Llerena Lara, 2007).

2.2.9.10. Cáscara de cacao

El uso de cáscaras de cacao procesadas adecuadamente para la elaboración de sustratos representa una alternativa viable, ya que permite transformar un residuo en un biomaterial útil y sostenible (Jacobo Marroquín y García Barrera, 2022).

2.3 Marco legal

2.3.1 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

Art. 1.- Naturaleza jurídica. Los recursos hídricos son parte del patrimonio natural del Estado y serán de su competencia exclusiva, la misma que se ejercerá concurrentemente entre el Gobierno Central y los Gobiernos Autónomos Descentralizados, de conformidad con la ley. El agua es patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio inalienable,

imprescriptible, inembargable y esencial para la vida, elemento vital de la naturaleza y fundamental para garantizar la soberanía alimentaria. (p. 3)

Art. 3.- Objeto de la Ley. El objeto de la presente ley es garantizar el derecho humano al agua, así como regular y controlar la autorización, gestión, preservación, conservación, restauración, de los recursos hídricos, uso y aprovechamiento del agua, la gestión integral y su recuperación, en sus distintas fases, formas y estados físicos, a fin de garantizar el *sumak kawsay* o buen vivir y los derechos de la naturaleza establecidos en la Constitución.

Art. 12.- Protección, recuperación y conservación de fuentes. El Estado, los sistemas comunitarios, las juntas de agua potable y las juntas de riego, los consumidores y usuarios son corresponsables de la protección, recuperación y conservación de las fuentes de agua y del manejo de páramos, así como la participación en el uso y administración de las fuentes de aguas que se hallen en sus tierras, sin perjuicio de las competencias generales de la Autoridad Única del Agua, de acuerdo con lo previsto en la Constitución y en esta Ley. (p. 6)

Art. 14.- Cambio de uso del suelo. El Estado regulará las actividades que puedan afectar la cantidad y calidad del agua, el equilibrio de los ecosistemas en las áreas de protección hídrica que abastecen los sistemas de agua para consumo humano y riego; con base en estudios de impacto ambiental que aseguren la mínima afectación y la restauración de los mencionados ecosistemas (Asamblea Nacional del Ecuador, p. 7).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque de la investigación

La presente investigación tuvo un enfoque cuantitativo, ya que empleó datos numéricos y análisis estadísticos para evaluar las relaciones causa-efecto de la aplicación de hidrogel y enmiendas.

3.1.1 Tipo y alcance de la investigación

3.1.1.1. Investigación aplicada

Este estudio buscó soluciones concretas para optimizar la retención hídrica y la nutrición de plántulas de cacao en vivero mediante hidrogel y enmiendas, con el fin de determinar el tratamiento más adecuado que maximizara el rendimiento. La selección del diseño experimental fue fundamental para llevar a cabo esta investigación de manera efectiva.

3.1.1.2. Investigación documental

Se fundamentó en información científica recopilada proveniente de tesis de grado, artículos científicos, libros, la biblioteca virtual de la Universidad Agraria del Ecuador (UAE) y libros sobre hidrogeles agrícolas, nutrición de cacao y técnicas de vivero.

3.1.1.3. Investigación experimental

La presente investigación de tipo experimental se llevó a cabo en la ciudad de Quevedo, mediante un diseño de bloques completos al azar (DBCA), el cual permitió evaluar el efecto de las enmiendas a base de N, P y $MgSO_4$ con hidrogel en variables fisiológicas y químicas del cacao.

3.1.2 Diseño de investigación

Esta investigación se basó en la evaluación de enmiendas con hidrogel para la retención de humedad y liberación controlada de macro y micronutrientes, a partir del uso de la arena como sustrato, conocida por su baja capacidad de retener humedad, lo que permitió visualizar con mayor precisión el efecto del hidrogel.

Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA), en el que se implementaron cinco tratamientos con el objetivo de evaluar su eficacia. Este diseño permitió manipular de forma controlada las variables involucradas, lo que garantizó las condiciones adecuadas para obtener resultados confiables durante el experimento.

3.2 Metodología

3.2.1 Variables

3.2.1.1. Variable independiente

- Hidrogel
- Nitrógeno (N)
- Fósforo (P)
- Sulfato de magnesio ($MgSO_4$)
- Arena

3.2.1.2. Variable dependiente

3.2.1.2.1. Contenido de humedad del sustrato (%).

Se midió cada 15 días (pesaje antes y después del secado). Las muestras se tomaron a 5 cm de profundidad en cada unidad experimental para conocer la disponibilidad hídrica del sustrato y su relación con el crecimiento de las plántulas.

3.2.1.2.2. Síntomas visuales de estrés hídrico.

Se realizó un monitoreo semanal en todas las unidades experimentales con una escala ordinal de marchitez de 0 a 5 (Ver Tabla 1), en el que se registraron síntomas como marchitez, clorosis, amarillamiento o necrosis, enrollamiento o caída de hojas. Esta variable permitió detectar diferencias en la respuesta al estrés por falta de agua, según la presencia de hidrogel en los tratamientos.

Tabla 1.

Escala ordinal de marchitez (0 – 5).

Valor	Categoría	Síntomas clave
0	Sin estrés	Turgente, hojas verdes y erectas.
1	Marchitez leve	Ligeramente decaída, pero se recupera por la noche. Sin clorosis.
2	Marchitez moderada	No se recupera del todo. Hojas inferiores amarillentas (clorosis) y bordes enrollados.
3	Marchitez severa	Decaimiento general. Amarillamiento extenso, enrollamiento pronunciado y puntas secas (necrosis incipiente).
4	Muy severa	Más del 50% del follaje seco (necrosis). Amarillamiento total y caída abundante de hojas.
5	Planta muerta	Totalmente seca, quebradiza o colapsada. Sin posibilidad de recuperación.

Elaborado por: La autora, 2026

3.2.1.2.3. pH del sustrato.

Se tomó una muestra, la cual se analizó en laboratorio. Además, se utilizaron tiras de pH con una disolución sustrato-agua. La medición se realizó al inicio 0 DDS y a los 90 DDS, con el fin de identificar cambios en la acidez del sustrato provocados por los tratamientos.

3.2.1.2.4. Altura de plántula (cm).

Para determinar la altura, se seleccionaron cinco plántulas al azar por unidad experimental. Se midió desde la base del tallo hasta el ápice de la yema terminal y se expresó en centímetros (cm). Para ello, se utilizó una cinta métrica. Esta evaluación se realizó a los 30, 45, 60, 75 y 90 días después de la siembra, con el fin de observar el crecimiento vertical bajo cada tratamiento.

3.2.1.2.5. Diámetro del tallo (mm).

Se utilizó un vernier analógico para medir el diámetro del tallo a 1 cm por encima de la base de la planta. Se seleccionaron cinco plántulas por unidad experimental y se evaluaron cada 15 días hasta los 90 DDS, con el propósito de identificar el efecto de los tratamientos en el engrosamiento del tallo.

3.2.1.2.6. Longitud de raíz (cm).

A los 90 días DDS, se extrajeron cuidadosamente cinco plántulas por unidad experimental para medir la longitud total de la raíz principal, expresada en centímetros (cm), desde su inicio en el cuello hasta la punta. Se utilizó una cinta métrica y se evaluó como parte de las variables destructivas al finalizar el ciclo del vivero.

3.2.1.2.7. Peso fresco de raíz (g).

Se lavaron las raíces de las plántulas seleccionadas para eliminar el sustrato y se pesaron de forma inmediata en una balanza digital de precisión. Esta medición se realizó a los 90 DDS como parte de la evaluación destructiva. Esto permitió estimar la biomasa fresca radicular.

3.2.1.2.8. Peso seco de raíz (g).

Luego del pesaje en fresco, las raíces se colocaron en un horno a 65 °C durante 48 horas. Posteriormente, se pesaron en una balanza digital de precisión para obtener el peso seco. Esta variable refleja la materia seca acumulada en la raíz y se evaluó a los 90 DDS.

3.2.1.2.9. Vigorosidad de plántulas.

Se aplicó una escala visual de uno al cinco, basada en el color de las hojas, el tamaño, la simetría y la sanidad de la plántula. Se seleccionaron cinco plantas por unidad experimental y se evaluaron a los 30, 60 y 90 DDS, con el objetivo de estimar la vigorosidad y uniformidad del crecimiento.

3.2.1.2.10. Asimilación de nutrientes (N, P, $MgSO_4$).

Se recolectaron hojas jóvenes completamente desarrolladas de cada unidad experimental a los 60 DDS y 90 DDS. Estas muestras se analizaron en laboratorio y se emplearon los métodos de Kjeldahl para nitrógeno, colorimétrico para fósforo y espectrofotometría de absorción atómica para magnesio. Este análisis permitió determinar la eficiencia en la absorción de nutrientes según el tratamiento aplicado.

3.2.1.2.11. Costos de producción.

Al finalizar el estudio se obtuvieron los datos que permitieron realizar un análisis de costos, con el propósito de determinar si los resultados obtenidos a partir del experimento eran económicamente viables.

3.2.2 Tratamientos

Tabla 2.

Descripción de tratamientos

Tratamientos	**Enmiendas**	**Hidrogel Dosis**	**Dosis Enmienda g/planta**	**Dosis Agua mL**
T1	Hidrogel + N	0.25	0.50	50
T2	Hidrogel + P	0.25	0.35	50
T3	Hidrogel + $MgSO_4$	0.25	0.50	50
T4	Testigo abs.	----------	Sin aplicación	50
T5	Hidrogel + N + P + $MgSO_4$	0.25	0.5-0.35-0.5g	50

Nota: Las 400 fundas se distribuyeron aleatoriamente en el área de vivero.

Elaborado por: La autora, 2026

3.2.3 Diseño experimental

En la investigación se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA), conformado por cinco tratamientos y cuatro repeticiones, con un total de 20 unidades experimentales, que incluyeron 400 plántulas en vivero.

Tabla 3.

Descripción del diseño experimental en campo

Descripción	Unidad
Número de tratamientos	5
Número de repeticiones	4
Número de unidades experimentales	20
Número de plantas por unidad experimental	20
Número de plantas a evaluar	5
Área total de ensayo	20 m²
Tamaño de las fundas	5x8 plg
Número total de plantas evaluadas	400

Elaborado por: La autora, 2026

Tabla 4.

Análisis ANDEVA

F.V.	Fórmula	Desarrollo	Grados de Libertad
Tratamientos	T – 1	5 – 1	4
Bloques	B - 1	4 - 1	3
Error	(T – 1) (R – 1)	(5-1) (4-1)	12
Total	(TR-1)	4*5-1	19

Elaborado por: La autora, 2026

3.2.4 Recolección de datos

3.2.4.1. Recursos

3.2.4.1.1. Recursos bibliográficos.

Para la realización de la presente investigación se consultaron de diversas fuentes bibliográficas como artículos científicos, tesis, libros, manuales técnicos y revistas.

3.2.4.1.2. Herramientas y equipos.

Las herramientas y materiales que utilizaron en el desarrollo del presente trabajo incluyeron plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.), madera, pala, sustrato, fundas de polietileno, cinta métrica, balanza digital de precisión, balde de plástico y calibrador de plástico.

3.2.4.1.3. Recursos económicos.

Los recursos destinados al desarrollo del proyecto fueron financiados con fondos propios de la autora.

Tabla 5.

Recursos económicos

Herramientas y equipos	Cantidad	Unidad	Valor unitario ($)	Total ($)
Cinta métrica	1	Unid.	20	20
Tiras de pH	100	Unid.	0,1	10
Balanza gramera	1	Unid.	25	25
Calibrador de vernier	1	Unid.	5	5
Productos				
Hidrogel	1	Kg	15	15
Urea	50	Kg	0,8	40
DAP	50	Kg	0,6	30
Sulfato de magnesio	50	Kg	1	50
Sustrato				
Arena	50	Kg	0,98	49
Infraestructura				
Caña	2	Unid.	8	16
Clavos	2	Unid.	1,5	3
Zaran	20	m	5	100
Utensilios varios				
Cinta de papel	1	Unid.	1	1
Regadera	1	Unid.	5	5
Fundas para vivero 5x8	400	Unid.	0,125	50
Otros gastos				40
Total				**459**

Elaborado por: La autora, 2026

3.2.4.2. Métodos y técnicas

3.2.4.2.1. Métodos de investigación.

El proyecto de investigación se realizó bajo los siguientes métodos:

Método deductivo

Se formularon conclusiones para cada uno de los objetivos específicos planteados a partir de la investigación exploratoria, donde se utilizó el programa estadístico InfoStat para analizar los datos obtenidos de las unidades experimentales y comparar los resultados.

Método inductivo

La información utilizada para elaborar el trabajo investigativo provino de fuentes confiables, lo que garantizó un alto grado de credibilidad en los resultados obtenidos.

Método experimental

La aplicación de diferentes dosis de hidrogel permitió identificar el tratamiento que obtuvo el mejor comportamiento agronómico, con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos y verificar la hipótesis de la investigación.

3.2.4.2.2. Manejo del ensayo.

El experimento se estableció en la ciudad de Quevedo, en un vivero bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA), con cinco tratamientos y cuatro repeticiones, para un total de 20 unidades experimentales. Las parcelas, de 20 m², estuvieron conformadas por plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) sembradas en fundas de polietileno de 5x8 pulgadas y con 1 metro de separación entre bloques para evitar interferencias entre las repeticiones.

Antes de la siembra, se realizó un análisis inicial de la arena de río utilizada como sustrato para determinar el pH y su capacidad de retención de agua. Las enmiendas se aplicaron de forma diferenciada según los tratamientos: T1 (N) 0.5 g/planta, T2 (P) 0.35 g/planta, T3 ($MgSO_4$) 0.5 g/planta, T4 (testigo absoluto) y T5 (N + P + $MgSO_4$) 0.5 - 0.35 - 0.5 g/planta.

En todos los tratamientos excepto el testigo (T4) se incorporó hidrogel en dosis de 0.25 g diluidos en 50mL de agua, con aplicaciones cada 15 días durante tres meses con el objetivo de mejorar la disponibilidad de agua en el sustrato sin provocar encharcamiento.

El control de malezas se llevó a cabo de forma manual y periódica. En caso de aparición de plagas o enfermedades, se realizó un monitoreo constante y se aplicaron medidas de control únicamente cuando se superaron los umbrales críticos de daño, que evitó alterar la respuesta de las plántulas a los tratamientos.

Durante los tres meses del ensayo, se evaluaron cinco plántulas al azar por bloque, que analizó variables morfológicas y fisiológicas cada 15 días, como altura de plántula, diámetro del tallo, número de hojas, longitud y peso fresco y seco de raíces, asimilación de nutrientes, vigorosidad, síntomas visuales de estrés hídrico, contenido de humedad del sustrato y pH.

La evaluación final se realizó a los 90 DDS, cuando las plántulas alcanzaron un desarrollo óptimo para su establecimiento en campo definitivo.

3.2.5 Análisis estadístico

Se empleó el análisis estadístico inferencial en esta investigación. Este tipo de análisis fue el método más adecuado para comparar el efecto de varios tratamientos sobre una o más variables. El modelo permitió evaluar si las diferencias observadas entre tratamientos fueron estadísticamente significativas mediante el análisis de varianza (ANDEVA). Posteriormente, la separación de medias se realizó mediante la prueba Tukey.

3.2.5.1. Hipótesis estadística

H0: No existieron diferencias significativas en las variables evaluadas entre los tratamientos aplicados en las plántulas de cacao en vivero.

Ha: Al menos un tratamiento con enmienda difirió significativamente de los demás en las variables evaluadas en las plántulas de cacao en vivero.

4. RESULTADOS

4.1 Determinación de la eficacia de la mejor enmienda con hidrogel en la retención de humedad

4.1.1 Contenido de humedad del sustrato (%)

En la tabla 6 se presentan los valores promedio del contenido de humedad del sustrato evaluados cada 15 días, desde los 30 hasta los 90 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

T5 evaluado a los 30 días, presenta el mayor contenido de humedad (20.5%), y se diferencia estadísticamente de T4 (testigo absoluto), que registró los menores porcentajes y una disminución progresiva a lo largo del ensayo. A los 90 días, se obtiene un coeficiente de variación (CV) de (7.8%) lo que indica una adecuada precisión experimental.

Tabla 6.

Contenido de humedad del sustrato.

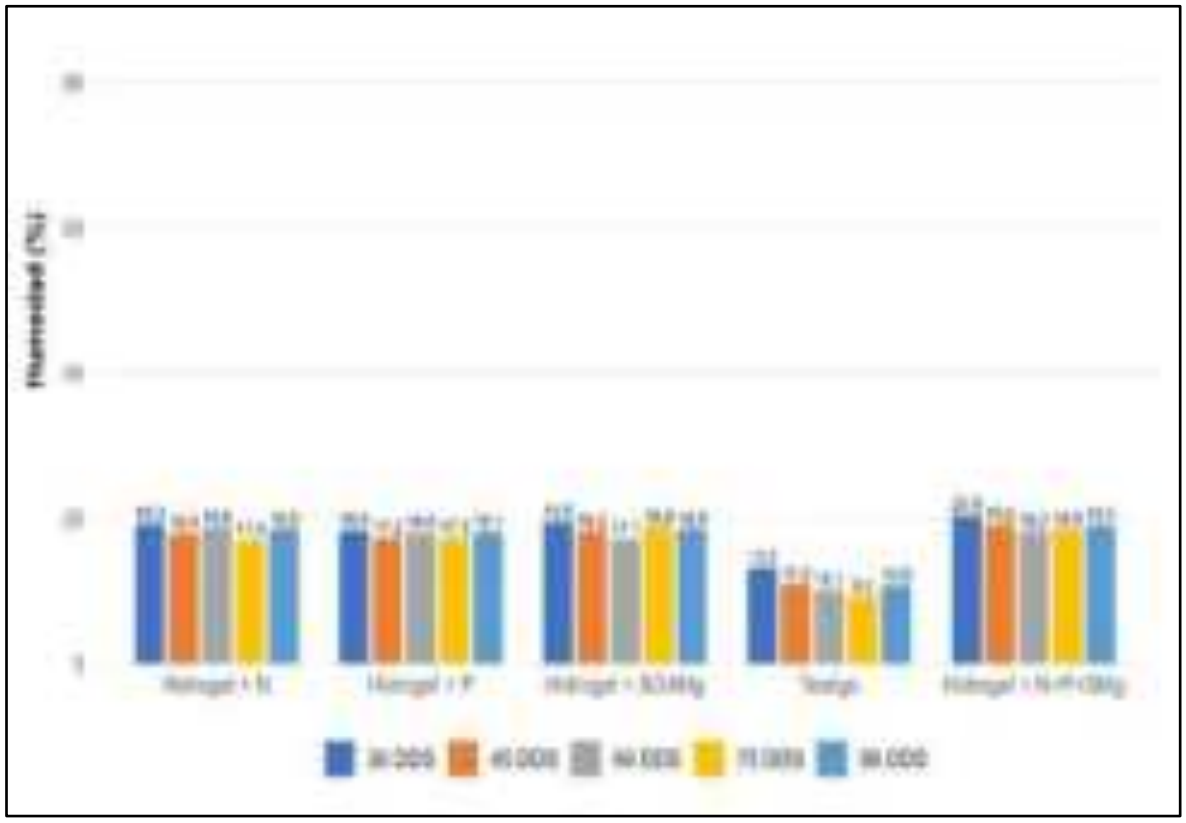
Descripción	30 DDS	45 DDS	60 DDS	75 DDS	90 DDS
T1: Hidrogel + N	19.3 a	19.1 a	18.9 a	18.6 a	18.4 a
T2: Hidrogel + P	19.0 a	18.8 a	18.6 a	18.3 a	18.1 a
T3: Hidrogel + $MgSO_4$	19.5 a	19.3 a	19.0 a	18.7 a	18.5 a
T4: Testigo absoluto	13.2 b	12.4 b	11.8 b	11.2 b	10.8 b
T:5 Hidrogel + N+P+$MgSO_4$	20.5 a	20.1 a	19.8 a	19.4 a	19.1 a
CV(%)	**7.2**	**7**	**7.3**	**7.6**	**7.8**

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 1.

Contenido de humedad del sustrato.



Elaborado por: La autora, 2026

4.1.2 Síntomas visuales de estrés hídrico

En la tabla 7 se presenta el porcentaje promedio de plántulas de cacao que manifiestan síntomas visuales de estrés hídrico durante el periodo de evaluación, de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

El tratamiento T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) registra la menor incidencia de síntomas de estrés hídrico (6%), y se diferencia estadísticamente de los demás tratamientos. Los tratamientos con aplicaciones individuales de hidrogel y fertilizantes T1, T2 y T3 también reducen significativamente la presencia de marchitez, clorosis y enrollamiento foliar en comparación con el tratamiento T4 (testigo absoluto), el cual presenta la mayor incidencia de estos síntomas (68%). El coeficiente de variación (CV) indica una adecuada precisión experimental.

Tabla 7.

Porcentaje de plántulas de cacao con síntomas de estrés hídrico.

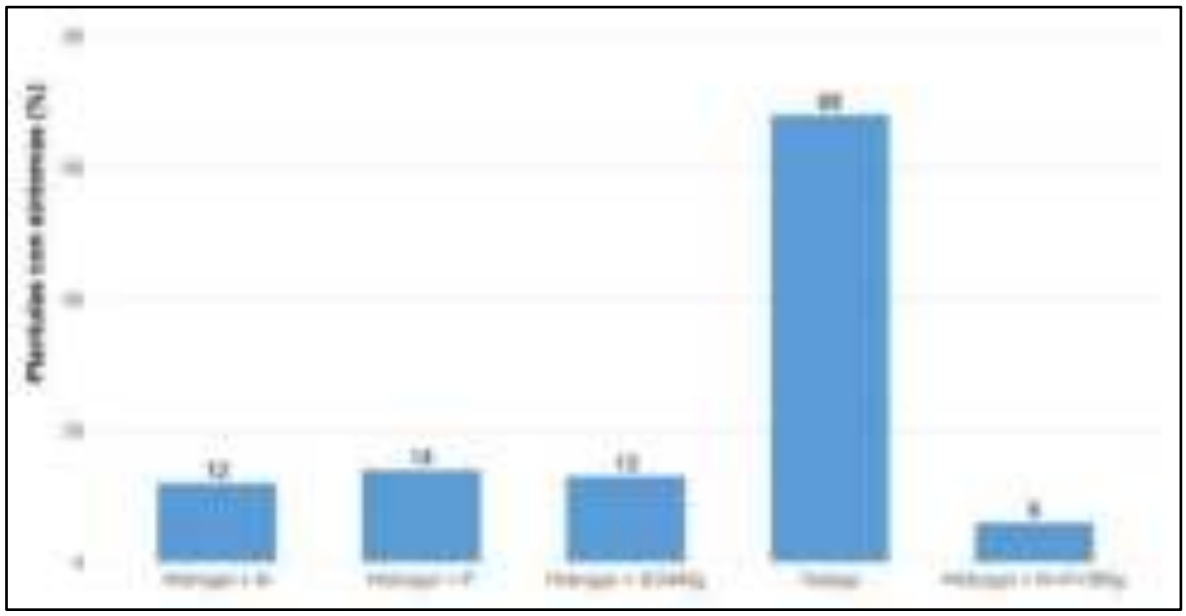
Tratamientos	Descripción	Estrés hídrico (%)
T1	Hidrogel + N	12 b
T2	Hidrogel + P	14 b
T3	Hidrogel + $MgSO_4$	13 b
T4	Testigo absoluto	68 a
T5	Hidrogel + N+P+$MgSO_4$	6 c
	CV (%)	11.2

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 2.

Plántulas de cacao con síntomas de estrés hídrico.



Elaborado por: La autora, 2026

4.1.3 pH del sustrato

En la tabla 8 se presentan los valores promedio del pH del sustrato evaluados a los 90 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

Los tratamientos evaluados mantienen valores del pH dentro de un rango similar, aunque se observaron diferencias estadísticas entre ellos. El tratamiento T5

(hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presenta valores de pH óptimos (6.4), mientras que T4 (testigo absoluto) registra valores ácidos. En general, las variaciones observadas evidencian que la incorporación del hidrogel y fertilizantes no produjo cambios drásticos en la reacción del sustrato durante el periodo de evaluación. El coeficiente de variación indica una adecuada precisión experimental. Ver Tabla 8.

Tabla 8.

pH del sustrato a los 90 DDS.

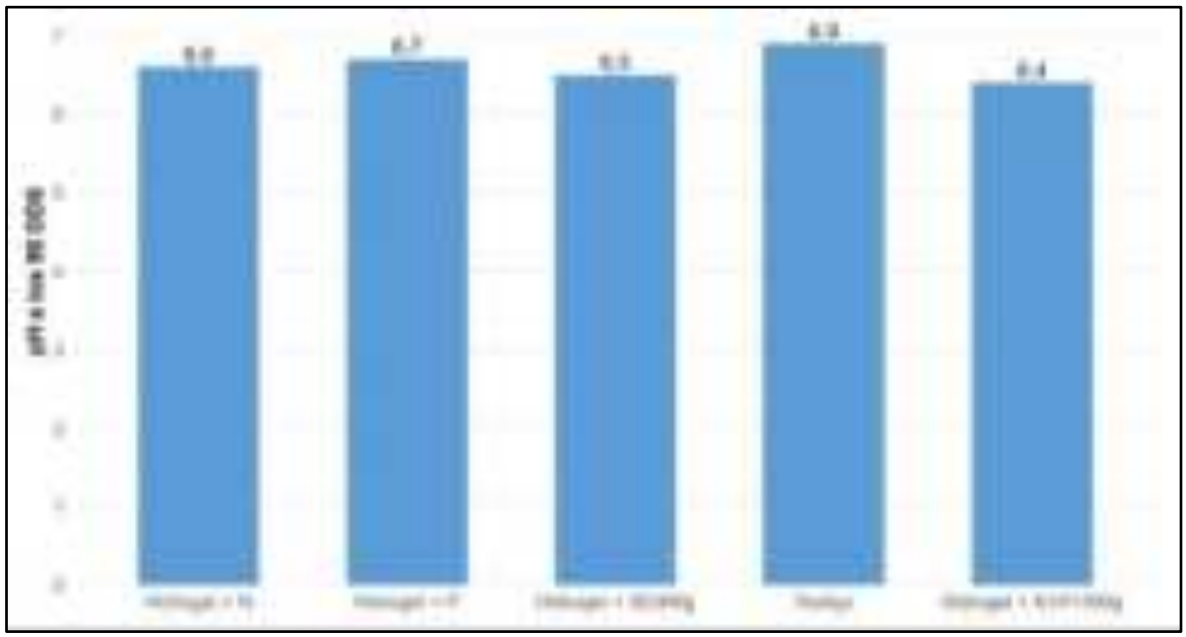
Tratamientos	Descripción	pH
T1	Hidrogel + N	6.6 ab
T2	Hidrogel + P	6.7 a
T3	Hidrogel + $MgSO_4$	6.5 ab
T4	Testigo absoluto	6.9 a
T5	Hidrogel + N+P+$MgSO_4$	6.4 b
	CV (%)	2.3

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 3.

pH del sustrato a los 90 DDS.



Elaborado por: La autora, 2026

4.2 Análisis de la interacción de los tratamientos con la mayor asimilación de elementos hidrosolubles a base de nitrógeno, fósforo y microelementos en el desarrollo de las plántulas

4.2.1 Altura de plántula (cm)

En la Tabla 9 se presentan los valores promedio de altura de las plántulas de cacao evaluadas a los 30, 45, 60, 75 y 90 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

El tratamiento T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presenta consistentemente la mayor altura evaluada a los 90 días (42.7cm), y se diferencia estadísticamente de los demás tratamientos. Los tratamientos con aplicaciones individuales de hidrogel y fertilizantes T1, T2, T3 presentan un crecimiento intermedio y superan a T4 (testigo absoluto) el cual registra los menores valores de altura en todas las evaluaciones. Asimismo, el coeficiente de variación (CV) obtenido (0.36%) evidencia una adecuada precisión experimental.

Tabla 9.

Altura de plántulas (cm).

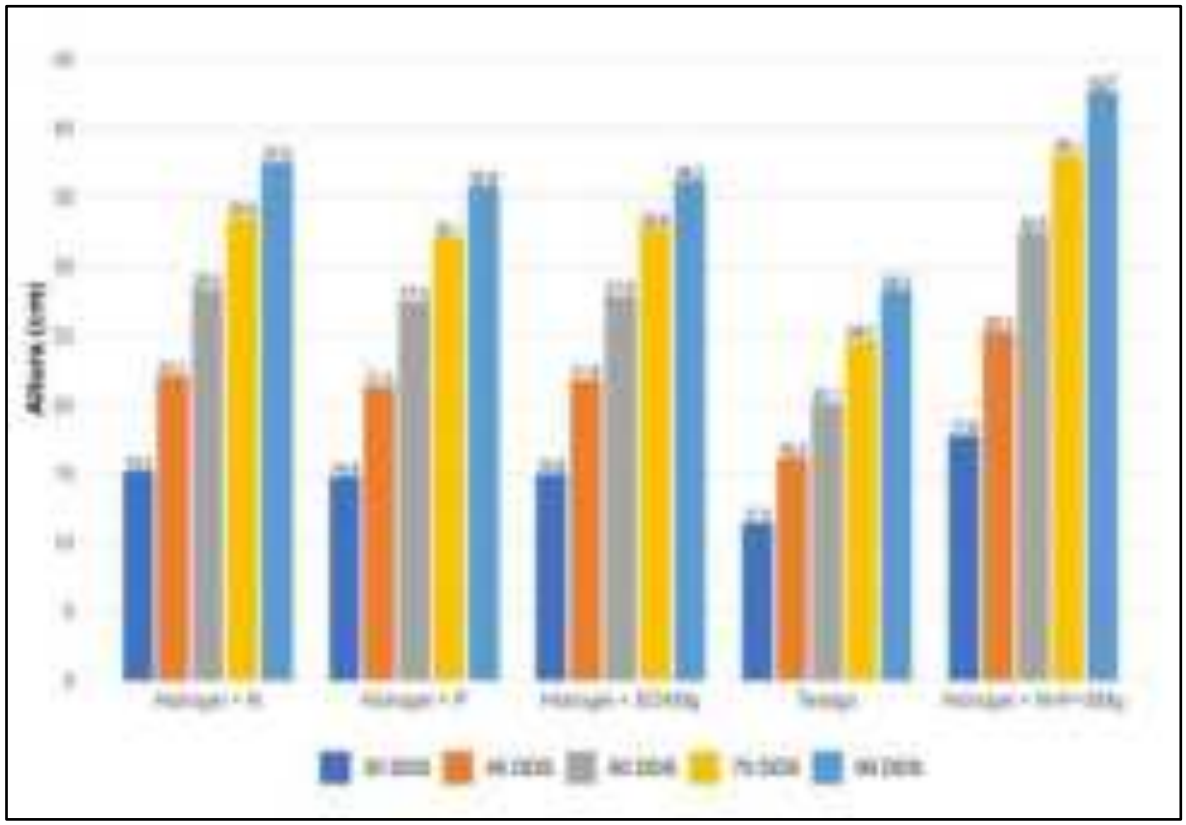
Descripción	**30 DDS**	**45 DDS**	**60 DDS**	**75 DDS**	**90 DDS**
T1: Hidrogel + N	15.2 b	22.1 b	28.4 b	33.6 b	37.5 b
T2: Hidrogel + P	14.8 b	21.3 c	27.5 c	32.1 d	35.8 d
T3: Hidrogel + $MgSO_4$	15.0 b	21.8 bc	27.9 bc	32.8 c	36.2 c
T4: Testigo absoluto	11.5 c	16.2 d	20.1 d	24.7 e	28.3 e
T:5 Hidrogel + N + P + $MgSO_4$	17.8 a	25.3 a	32.5 a	38.1 a	42.7 a
CV(%)	**3.75**	**1.18**	**1.24**	**0.40**	**0.36**

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 4.

Altura de plántulas (cm).



Elaborado por: La autora, 2026

4.2.2 Diámetro del tallo (mm)

En la Tabla 10 se presentan los valores promedio de diámetro del tallo de las plántulas de cacao evaluados a los 30, 45, 60, 75 y 90 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

El tratamiento T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) registra el mayor diámetro del tallo evaluado a los 90 días (7.21mm), y se diferencia estadísticamente de los demás tratamientos. Los tratamientos con aplicaciones individuales de hidrogel y fertilizantes T1, T2 y T3 muestran un comportamiento intermedio y superan a T4 (testigo absoluto), que presenta los menores valores en todas las evaluaciones. Asimismo, el coeficiente de variación (CV) de (0.61%) evidencia una adecuada precisión experimental.

Tabla 10.

Diámetro del tallo de plántulas (mm).

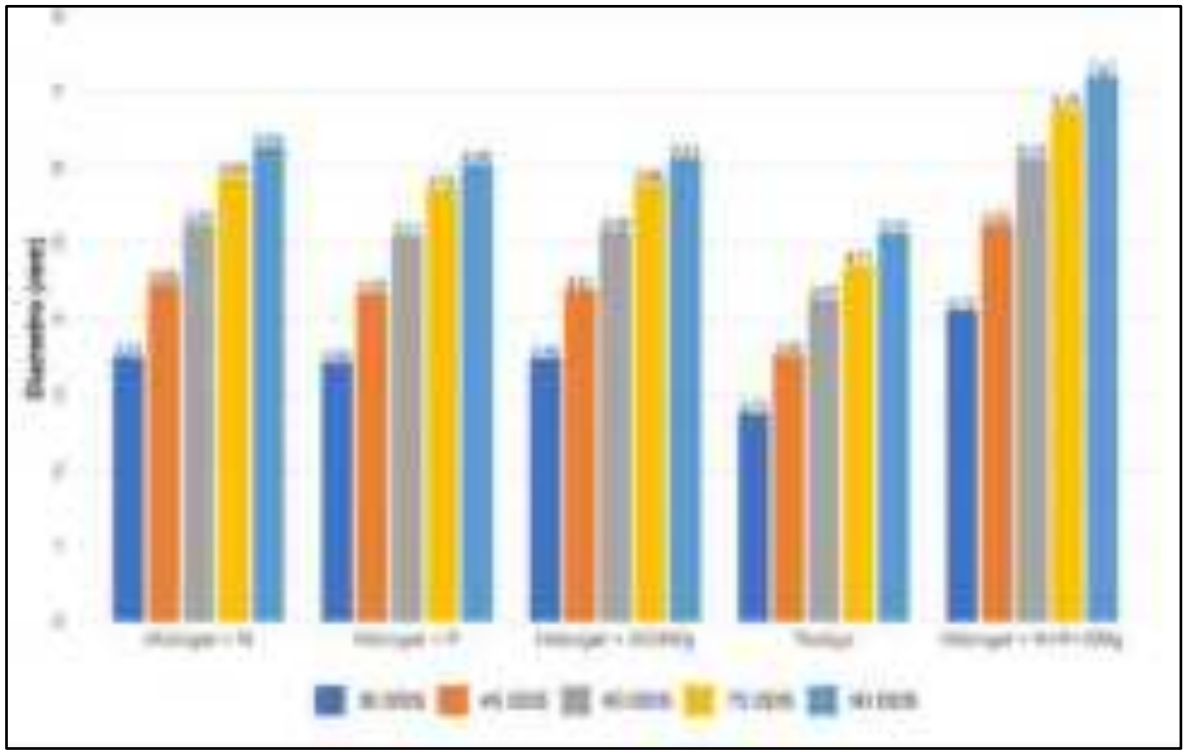
Descripción	30 DDS	45 DDS	60 DDS	75 DDS	90 DDS
T1: Hidrogel + N	3.51 b	4.48 b	5.25 b	5.89 b	6.28 b
T2: Hidrogel + P	3.42 c	4.35 c	5.11 c	5.72 c	6.05 c
T3: Hidrogel + $MgSO_4$	3.48 b	4.41 c	5.18 bc	5.80 c	6.13 c
T4: Testigo absoluto	2.75 d	3.52 d	4.20 d	4.71 d	5.14 d
T:5 Hidrogel + N + P + $MgSO_4$	4.12 a	5.25 a	6.13 a	6.78 a	7.21 a
CV(%)	**0.69**	**0.68**	**0.66**	**0.65**	**0.61**

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 5.

Diámetro del tallo de plántulas (mm).



Elaborado por: La autora, 2026

4.2.3 Longitud de raíz (cm)

La Tabla 11 presentan valores promedio de la longitud de la raíz principal de las plántulas de cacao evaluada a los 90 días después de la siembra DDS, de

acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

El tratamiento T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$), presenta la mayor longitud radicular (28.6cm), y se diferencia estadísticamente de los demás tratamientos.

Los tratamientos con aplicaciones individuales de hidrogel y fertilizantes T1, T2 y T3 mostraron valores intermedios, mientras que T4 (testigo absoluto) registra la menor longitud de raíz. El coeficiente de variación (CV) obtenido indica una adecuada precisión experimental.

Tabla 11.

Longitud de raíz principal de plántulas (cm).

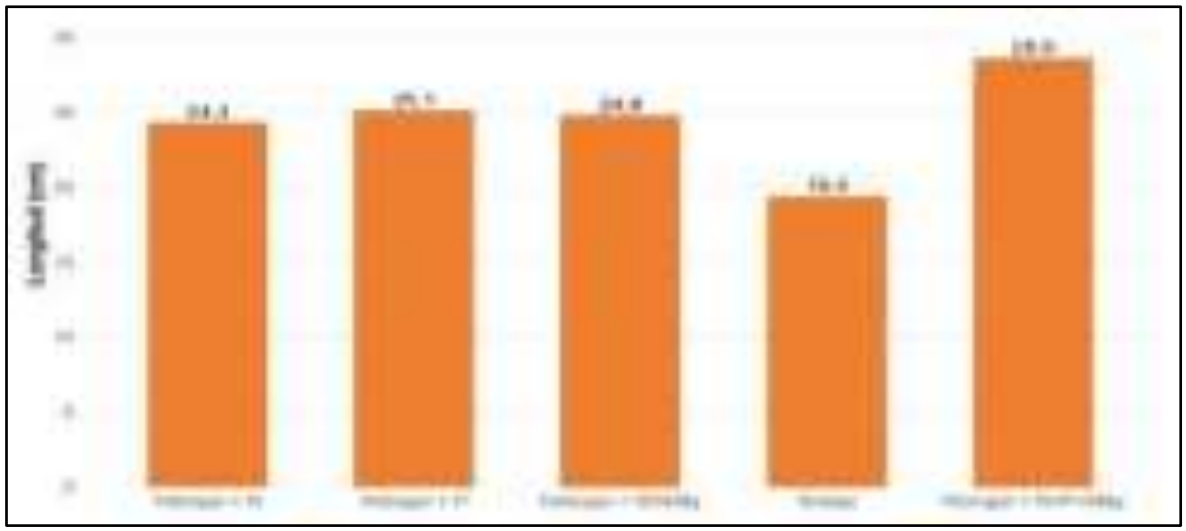
Tratamiento	Descripción	Longitud (cm)
T1	Hidrogel + N	24.3 b
T2	Hidrogel + P	25.1 b
T3	Hidrogel + $MgSO_4$	24.8 b
T4	Testigo absoluto	19.4 c
T5	Hidrogel + N+P+$MgSO_4$	28.6 a
CV (%)		6.2

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 6.

Longitud de raíz principal de plántulas (cm).



Elaborado por: La autora, 2026

4.2.4 Peso fresco y peso seco de raíz (g)

En la Tabla 12 se presenta los valores promedio del peso fresco y peso seco de la raíz de las plántulas, evaluados a los 90 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

El tratamiento T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) registra los mayores valores de peso fresco y peso seco de la raíz (9.8g – 4.3g), y se diferencia estadísticamente de los demás tratamientos. Los tratamientos con aplicaciones individuales de hidrogel y fertilizantes T1, T2 y T3 mostraron valores intermedios y superan a T4 (testigo absoluto), que obtiene la menor acumulación de biomasa radicular. Los coeficientes de variación (CV) indica una adecuada precisión experimental.

Tabla 12.

Peso fresco y peso seco de la raíz de plántulas (g).

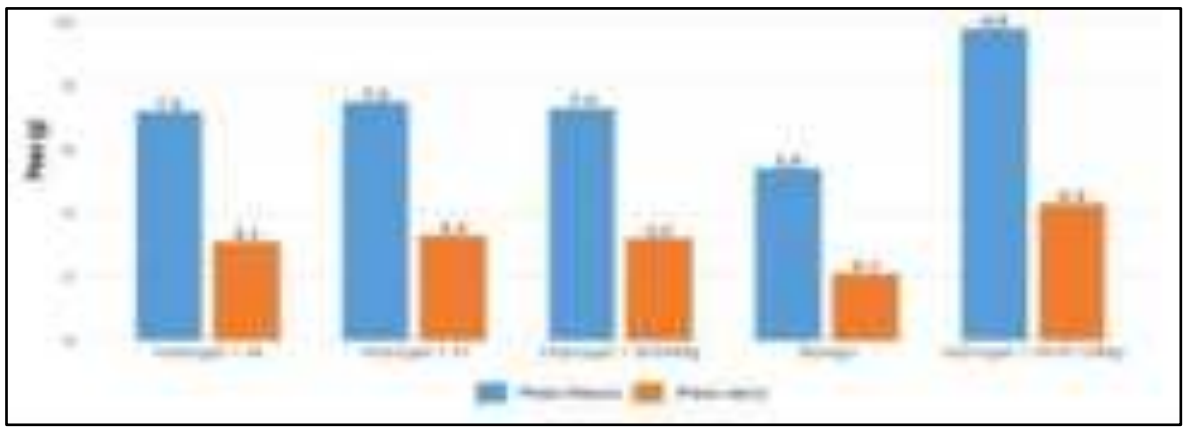
Tratamientos	Descripción	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
T1	Hidrogel + N	7.2 b	3.1 b
T2	Hidrogel + P	7.5 b	3.3 b
T3	Hidrogel + $MgSO_4$	7.3 b	3.2 b
T4	Testigo absoluto	5.4 c	2.1 c
T5	Hidrogel + N+P+$MgSO_4$	9.8 a	4.3 a
	CV (%)	8.3	7.9

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 7.

Peso fresco y peso seco de la raíz de plántulas (g).



Elaborado por: La autora, 2026

4.2.5 Vigorosidad de plántulas

En la tabla 13 se presentan los valores promedio de la vigorosidad de las plántulas de cacao, evaluadas 30, 60, 90 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

El tratamiento T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presenta la mayor vigorosidad evaluada a los 90 días (4.8), y se diferencia estadísticamente de los demás tratamientos. Los tratamientos con aplicaciones individuales de hidrogel y fertilizantes T1, T2 y T3 muestran valores intermedios y superan al tratamiento T4 (testigo absoluto), que registra la menor vigorosidad en todas las evaluaciones. El coeficiente de variación (CV) de (6.5) indicó una adecuada precisión experimental.

La Figura 8 muestra el incremento progresivo de la vigorosidad en todos los tratamientos y confirma el comportamiento superior del tratamiento T5.

Tabla 13.

Vigorosidad de plántulas.

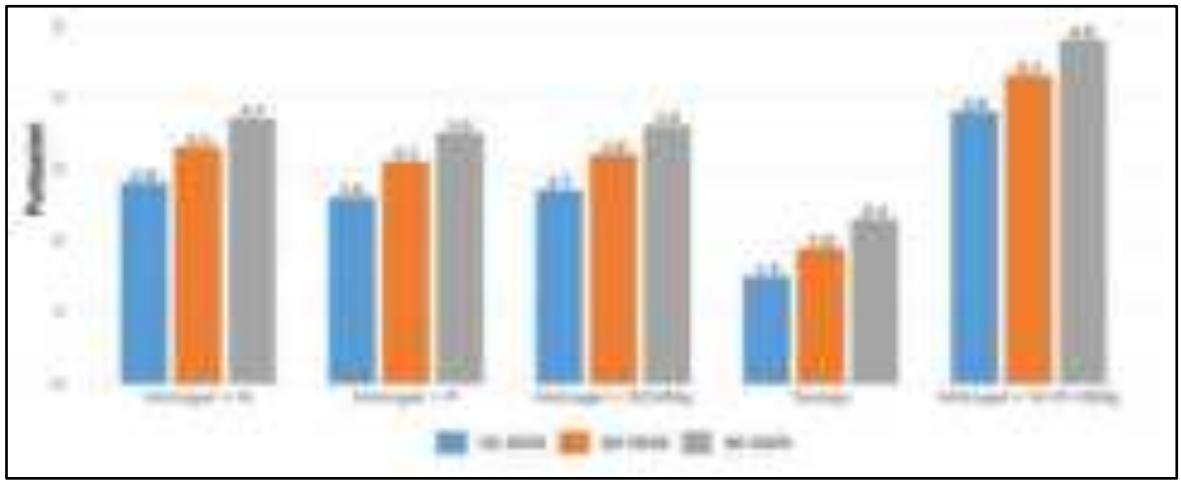
Descripción	30 DDS	60 DDS	90 DDS
T1: Hidrogel + N	2.8 b	3.3 b	3.7 b
T2: Hidrogel + P	2.6 b	3.1 b	3.5 b
T3: Hidrogel + $MgSO_4$	2.7 b	3.2 b	3.6 b
T4: Testigo absoluto	1.5 c	1.9 c	2.3 c
T:5 Hidrogel + N+P+$MgSO_4$	3.8 a	4.3 a	4.8 a
CV (%)	**7.2**	**6.8**	**6.5**

Nota: Medias con letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 8.

Vigorosidad de plántulas.



Elaborado por: La autora, 2026

4.2.6 Asimilación de nutrientes (N, P y $MgSO_4$)

En la tabla 14 se presentan los resultados del análisis foliar de las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y sulfato de magnesio ($MgSO_4$) en las plántulas de cacao evaluadas a los 60 y 90 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con el análisis de varianza se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa en los tratamientos.

El tratamiento T5 (Hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presenta el mejor comportamiento nutricional, al mantener concentraciones de N y $MgSO_4$ en un rango excesivo y P en un rango adecuado (N 0.98 – 0.85) (P 1.35 – 1.15) ($MgSO_4$ 0.72 – 0.60). El tratamiento T4 (testigo absoluto) presenta una disminución progresiva de los niveles de N, P y $MgSO_4$ lo que alcanza concentraciones deficientes durante el periodo de evaluación.

Tabla 14.

Concentración foliar de (N), (P) y ($MgSO_4$).

	60 DDS			90 DDS		
Tratamientos	**N (%)**	**P (%)**	**$MgSO_4$ (%)**	**N (%)**	**P (%)**	**$MgSO_4$ (%)**
T1	0.45 (d)	0.25 (d)	0.18 (d)	0.28 (d)	0.12 (d)	0.08 (d)
T2	1.05 (e)	0.26 (d)	0.17 (d)	0.88 (e)	0.15 (d)	0.09 (d)
T3	0.44 (d)	2.25 (a)	0.18 (d)	0.26 (d)	2.55 (a)	0.08 (d)
T4	0.43 (d)	0.26 (d)	0.85 (e)	0.27 (d)	0.13 (d)	0.65 (e)
T5	0.98 (e)	1.35 (a)	0.72 (e)	0.85 (e)	1.15 (a)	0.60 (e)

Nota: D = Deficiente, A = Adecuado, E = Excesivo

Elaborado por: La autora, 2026

4.3 Análisis de costos con la mejor propuesta de tratamiento

4.3.1 Costos de producción

En la tabla 15 se presentan los costos de producción por planta correspondientes a los tratamientos evaluados durante el periodo experimental. El T5 (Hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presenta el mayor costo de producción por planta ($0.25) en comparación al T4, que registra un costo de ($0.19).

Sin embargo, este tratamiento alcanza un incremento del 51% en la altura de las plántulas, un 105% en la biomasa radicular, y redujo la incidencia de síntomas de estrés hídrico del 68% al 6%, lo que justifica la inversión adicional debido a la mayor calidad del material vegetal obtenido.

Tabla 15.

Costo de insumos por tratamiento (USD).

	T1	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**
Hidrogel	1,20	1,20	1,20	0,00	1,20
Urea	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
DAP	0,00	1,00	0.00	0,00	1,00
Sulfato de Mg	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00
Fundas	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Arena	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80
Plántulas	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Total	17,00	17,00	18,00	14,80	20,00
Costo/planta	**0,21**	**0,21**	**0,23**	**0,19**	**0,25**

Elaborado por: La autora, 2026

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación del hidrogel favorece significativamente la retención de humedad del sustrato durante la fase de vivero. T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) registra 20.5% de humedad a los 30 DDS y 19.1% a los 90 DDS, mientras que T4 (testigo absoluto) presenta 13.2% y 10.8%, respectivamente. A los 90 DDS, T5 mantiene 8.3 puntos porcentuales más de humedad, equivalente a un 76.9% más respecto al testigo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Banedjschafie y Durner (2015), quienes evalúan la aplicación del hidrogel en arena a concentraciones de 0.3%, 0.6% y 1.0% (p/p) y determinan que el agua disponible para las plantas aumenta de 0.005 g g^{-1} en la arena sin polímero a 0.06, 0.20 y 0.28 g g^{-1}, respectivamente, que demuestra que la incorporación del hidrogel aumenta la capacidad del medio arenoso para almacenar agua. En concordancia con estos hallazgos, Narjary et al. (2012) evalúan el efecto de un polímero superabsorbente en un suelo arenoso, que encuentra que su incorporación incrementa significativamente la capacidad de retención hídrica y el agua disponible para las plantas. Por tanto, ambas investigaciones coinciden con los resultados del presente estudio.

En cuanto al estrés hídrico, T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presenta únicamente 6% de plántulas con síntomas de estrés hídrico, mientras que T4 (testigo absoluto) alcanza 68%; por tanto, T5 reduce la incidencia en 62 puntos porcentuales, equivalente a aproximadamente 91.2% respecto al testigo. Los tratamientos T1, T2 y T3 presentan valores intermedios de 12%, 14% y 13%, respectivamente. Estos resultados guardan relación con lo reportado por Susilo et al. (2019), quienes someten 11 genotipos de cacao en fase de plántula a condiciones de 25% y 100% de agua disponible. Al reducir la disponibilidad de agua de 100% a 25%, el diámetro del tallo disminuye de 0.65 a 0.49 cm (24.6%), el área foliar de 114.03 a 65.07 cm^2 (42.9%) y el volumen radicular de 4.59 a 3.12 mL (32.0%). Asimismo, la biomasa seca de la parte aérea disminuye de 5.27 a 1.90 g, equivalente a una reducción de aproximadamente 63.9% bajo déficit hídrico. Esta tendencia coincide, además, con lo señalado por García Lozano y Moreno Fonseca (2016), quienes evalúan plántulas de cacao en vivero sometidas a contenidos volumétricos de agua de 10%, 20%, 25% y 30%, equivalentes a 0%, 75%, 100% y 120% de agua disponible, respectivamente. En este sentido, ambos estudios respaldan los resultados obtenidos.

Los resultados del análisis foliar muestran diferencias en la concentración de nutrientes entre los tratamientos. En T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$), a los 60 DDS se registran concentraciones de 0.98% de N, 1.35% de P y 0.72% de Mg, mientras que a los 90 DDS los valores corresponden a 0.85%, 1.15% y 0.60%, respectivamente. La respuesta obtenida guarda relación con lo indicado por Puentes-Páramo et al. (2016), quienes evalúan durante tres años cinco niveles de fertilización NPK 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de cacao CCN-51 y encuentran diferencias en las concentraciones foliares de nutrientes atribuibles tanto a los tratamientos de fertilización. Los autores analizan 11 nutrientes, incluidos N, P y $MgSO_4$, y establecen las concentraciones foliares asociadas con los tratamientos de mayor rendimiento, lo que evidencia que el estado nutricional del cacao responde cuantitativamente al nivel de fertilización aplicado, un segundo argumento concuerda con Dogbatse et al. (2021)**,** quienes evalúan seis tratamientos de fertilización. El tratamiento que combina 75% de la dosis recomendada de sulfato de amonio presenta las mayores concentraciones foliares de nutrientes entre los tratamientos. Asimismo, la supervivencia de las plantas oscila entre 73.3% y 89.3% y es superior en los tratamientos con aporte combinado de nutrientes. En conjunto ambos estudios coinciden con los resultados de la presente investigación.

T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) presenta la mayor altura durante todo el periodo experimental, con un incremento de 17.8 cm a los 30 DDS a 42.7 cm a los 90 DDS, mientras que T4 (testigo absoluto) aumenta de 11.5 a 28.3 cm durante el mismo periodo. A los 90 DDS, T5 supera al testigo en 14.4 cm, equivalente a un incremento aproximado del 50.9%. Estos resultados presentan concordancia con los obtenidos por Quiñones-Cabezas et al. (2024), quienes evalúan cinco tratamientos de fertilización con N, P, K, Ca y Mg en plántulas de cacao bajo condiciones de vivero. El tratameinto con 7 g de Ca y 3.2 g de Mg, alcanza la mayor altura, con 61.53 cm, frente a 45.40 cm en el tratamiento sin fertilización, lo que representa aproximadamente 35.5% más altura. De manera similar, Prasatyio et al. (2025) evalúan plántulas de cacao cultivadas en bolsas bajo nueve combinaciones de fertilización, en las que utilizan 0,7 y 14 g de NPK por plántula combinados con 83.166 y 249g de compost y la combinación de 7g de NPK + 166g de compost por plántula presenta la mejor respuesta de crecimiento. Por consiguiente, ambas investigaciones coinciden con la tendencia observada en el presente estudio.

En cuanto al análisis de costos, T5 (N, P y $MgSO_4$) presenta una inversión de $0.25 por planta, superior a T4 (testigo absoluto), cuyo costo es de $0.19 por planta. Sin embargo, esta mayor inversión está acompañada de una mejor respuesta agronómica. Estos resultados concuerdan con Vargas Guillén et al. (2024), quienes evalúan diferentes sustratos y fórmulas de fertilización NPK en plántulas de cacao bajo condiciones de vivero y determinan que el tratamiento con suelo franco + NPK 8-24-8 presenta el mejor comportamiento en las variables de crecimiento, además de generar un beneficio neto de $197 y una relación beneficio/costo de $1.57. No obstante, los resultados difieren parcialmente de lo reportado por Quiñones-Cabezas et al. (2024), quienes determinan que el tratamiento sin fertilización presenta la mayor rentabilidad económica debido a sus menores costos, aunque muestra un bajo desempeño en las variables fisiológicas; en contraste, los tratamientos fertilizados incrementan los costos, pero favorece el desarrollo de las plántulas. En conjunto, ambas investigaciones permiten establecer que el análisis económico no debe limitarse únicamente al tratamiento de menor costo, sino considerar conjuntamente la inversión realizada y la respuesta agronómica obtenida.

En conjunto, la discusión de los resultados respalda la aceptación de la hipótesis planteada, ya que la incorporación del hidrogel en combinación con fertilizantes hidrosolubles utilizado en los tratamientos como T5 (N, P y $MgSO_4$) favorece el desarrollo morfológico y fisiológico de las plántulas de cacao durante la fase de vivero. La mayor retención de humedad, la reducción del estrés hídrico, el mejor crecimiento vegetativo y radicular, así como el mayor aprovechamiento de los nutrientes, evidencian que la interacción entre el hidrogel y la fertilización balanceada constituye una estrategia eficiente para mejorar el desarrollo inicial del cultivo bajo las condiciones evaluadas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se demuestra que la implementación del tratamiento T5 (hidrogel + N + P + $MgSO_4$) durante todo el periodo de evaluación mantiene mayores porcentajes de humedad en la arena y permite conservar una mayor disponibilidad de agua. En relación con el estrés hídrico, los tratamientos con hidrogel presentan una incidencia de marchitez inferior al 15%, mientras que el tratamiento testigo alcanza el (68%), lo que evidencia en una mayor disponibilidad de agua reduce el déficit hídrico en las plántulas.

Entre los tratamientos evaluados, T5 presenta las mayores concentraciones de nitrógeno, fósforo y magnesio en los tejidos vegetales, resultados que son corroborados mediante los análisis foliares realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Esta mayor asimilación de nutrientes se refleja en un mejor desarrollo morfológico de las plántulas, al registrar los mayores valores de altura, diámetro del tallo, longitud y biomasa radicular. Aunque T1 (hidrogel + N), T2 (hidrogel + P) y T3 (hidrogel + $MgSO_4$) también muestran respuestas favorables respecto a T4 (testigo absoluto), sus efectos son más específicos y están relacionados con las funciones particulares de cada nutriente, mientras que T5 presenta una respuesta integral al combinar los elementos evaluados. Esto indica que su efecto no se limita únicamente al crecimiento vegetativo, sino que influye positivamente en el desarrollo integral de las plántulas en fase de vivero.

El tratamiento T5 resulta ser la alternativa más rentable en la relación beneficio/costo (B/C) con un costo de $0.25 por plántula. Aunque presenta el mayor costo de producción, permite obtener plántulas de mayor altura, con mayor biomasa radicular y reducir drásticamente el estrés hídrico, lo que respalda su implementación en viveros de cacao.

6.2 Recomendaciones

Con base a los resultados obtenidos se recomienda implementar 0.25g de hidrogel en el sustrato para la producción de plántulas en viveros de cacao, especialmente en zonas con disponibilidad limitada de agua, debido a que permite un suministro gradual de este recurso, reduce las pérdidas por lixiviación y mejora la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes.

Se propone utilizar la combinación de N (0.50g), P (0.25g) y $MgSO_4$ (0.50g), debido a que estas dosis aplicadas conjuntamente, demostraron el mejor desempeño agronómico en las plántulas, al favorecer una mayor asimilación de nutrientes durante 90 días, así como un mejor desarrollo vegetativo y radicular.

Se considera la relación entre el costo de producción y el desempeño agronómico de las plántulas, con prioridad para los tratamientos que justifiquen su inversión adicional mediante una mejor respuesta durante la fase de vivero, como T5, que con un costo de $0.25 por plántula presentó el mejor desempeño, lo que permitió obtener una mayor calidad y desarrollo vegetativo.

BIBLIOGRAFÍA

Abdallah, A. M. (2019). The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress. *International soil and water conservation research*, *7*(3), 275-285. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.001

Alcoverro. (2009). *Sustratos para semilleros en horticultura ecológica*. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. http://descargas.grancanaria.com/agricultura/formacion/curso%20viveros%20ecologicos/semilleros%20ecologicos.pdf

Altamirano Arevalo, J. E. y Rivera Poma, M. F. (2025). Determinantes de la competitividad de la exportación de cacao en el Ecuador. Período 2015-2023. *Arandu UTIC*, *12*(2), 1111-1135. https://doi.org/10.69639/arandu.v12i2.980

Arteaga Cuba, M. N. (2019). *Efecto de la biofertilización en plántulas de Theobroma cacao L. Con micorrizas arbusculares nativas del área de conservación municipal "Bosque de Huamantanga" de la provincia de Jaén – Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional De Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. http://hdl.handle.net/20.500.14074/3138

Banedjschafie, S., & Durner, W. (2015). Water retention properties of a sandy soil with superabsorbent polymers as affected by aging and water quality. *Journal of plant nutrition and soil science*, *178*(5), 798-806. https://doi.org/10.1002/jpln.201500128

Barragán. (2017). *Relación entre los parámetros hídricos, morfológicos y rendimiento de cacao (Theobroma cacao* L*.) Como criterio de selección para la tolerancia al déficit hídrico*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio Institucional UTEQ. https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e548d587-2977-475f-9100-f2c05b27008d/content

Castro-Alayo, E. M., Idrogo-Vásquez, G., Siche, R., & Cardenas-Toro, F. P. (2019). Formation of aromatic compounds precursors during fermentation of criollo and forastero cocoa. *Heliyon*, *5*(1), e01157. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01157

Cromtek. (2022, 7 de noviembre). *La importancia del contenido de agua en los suelos.* https://www.cromtek.cl/2022/11/07/la-importancia-del-contenido-de-agua-en-los-suelos/

Dávila Brugman J. J.. (2021). *Aplicación de biofertilizante líquido vía foliar y edáfica para la producción de plantones de cacao (Theobroma cacao* L.*)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria De La Selva Facultad De Agronomía]. Repositorio Institucional UNAS. https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ba0cb4e4-44e7-417e-b009-851164b00963/content

Daza Triana y Salguero Abril, A. M. (2015). *Evaluación del efecto de 10 sustratos a base de aserrín crudo sobre la germinación y la calidad de la planta en el crecimiento inicial de Quercus humboldtii Bonpl y Cedrela montana Moritz ex Turcz*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/22387/33376829.pdf?sequence=1&isallowed=y

Defaz Quilumba, C. L. (2016). *Evaluación de diferentes tipos de sustratos en vivero de cacao (Theobroma cacao L.)* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Estatal De Quevedo]. Repositorio Digital UTEQ. https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/1908

Dey, S., Purakayastha, T. J., Sarkar, B., Rinklebe, J., Kumar, S., Chakraborty, R., Datta, A., Lal, K., & Shivay, Y. S. (2023). Enhancing cation and anion exchange capacity of rice straw biochar by chemical modification for increased plant nutrient retention. *Science of the Total Environment*, *886*, Article 163681. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163681

Dogbatse, J. A., Arthur, A., Awudzi, G. K., Quaye, A. K., Konlan, S., & Amaning, A. A. (2021). Effects of organic and inorganic fertilizers on growth and nutrient uptake by young cacao (*Theobroma cacao* L.). *International Journal Of Agronomy*, *2021*, Article 5516928. https://doi.org/10.1155/2021/5516928

Enríquez Jaramillo, F., Castro, C., & Jiménez Pozo, P. (2018). Caracterización de los efectos el desarrollo de plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en vivero. *Revista Alfa*, *2(*5*),* 101-116. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v2i5.42

Fertilab (2025). *Beneficios de la fibra de coco como sustrato*. https://www.fertilab.com.mx/adminfertilab/notas_tecnicas/pdf_nota/beneficios_de_la_fibra_de_coco_como_sustrato.pdf

García Macías, G. M. (2021). *Evaluación de la fertilización mineral y orgánica en cacao (Theobroma cacao L.) en condiciones de vivero* [Tesis de pregrado,

Universidad Agraria Del Ecuador]. Archivo digital. https://cia.uagraria.edu.ec/archivos/garcia%20macias%20geraldin%20melissa.pdf

García Lozano, J., & Moreno Fonseca, L. P. (2016). Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica*, *65*(1), 44-50 . https://doi.org/10.15446/acag.v65n1.48161

Hendi, A., Hassan, M., Elsherif, M., Alqattan, B., Park, S., Yetisen, A. K., & Butt, H. (2020). Healthcare applications of pH-sensitive hydrogel-based devices: A review. *International Journal Of Nanomedicine*, *15*, 3887-3901. https://doi.org/10.2147/ijn.s245743

Jacobo Marroquín, J. R., & García Barrera, A. V. (2022). *Obtención y caracterización fisicoquímica de un sustrato nutritivo hecho a partir de los desechos del cacao para la producción de plántulas de hortalizas.* Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE. https://www.itca.edu.sv/wp-content/uploads/2022/12/03-informe-final-qu%c3%admica-2021-e-book.pdf

Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. (2009). *Manual de cultivo de cacao para la Amazonía ecuatoriana*. https://www.iniap-ecuador.org.ec

Kaur, P., Agrawal, R., Pfeffer, F. M., Williams, R., & Bohidar, H. B. (2023). Hydrogels in agriculture: Prospects and challenges. *Journal of Polymers and the Environment*, *31*(9), 3701-3718. https://doi.org/10.1007/s10924-023-02859-1

Leiva-Rojas, E. I., Hernández-Taborda, C., & Ramirez, R. (2024). Application of photosynthesis models to determine light requirements in three cacao clones. *Ingeniería e Investigación*, *44*(3), Article e107078. https://doi.org/10.15446/ing.investig.107078

Li, Y., Hu, C., J., Yan, B., Zhang, Y., Shi, L., & Ran, R. (2020). Hydrogel-based temperature sensor with water retention, frost resistance and remoldability. *Polymer*, *186*, Article 122027. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.122027

Llerena Lara, E. de los Á. (2007). *Comportamiento de dos genotipos de tomate riñon (lycopersicum esculentum Mill.) en diferentes sustratos hidroponicos en Yuyucocha* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Del Norte]. Repositorio Digital UTN. https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/232

Ludeña Dávila, V. (2013). *efecto de la fertilizacion organica y microelementos en el rendimiento de cacao CCN51 (Theobroma cacao L.) en Jaén* [Tesis de

pregrado, Universidad Nacional Agraria De La Selva]. Repositorio Institucional UNAS. https://hdl.handle.net/20.500.14292/1061

Lumactud, R. A., Dollete, D., Liyanage, D. K., Szczyglowski, K., Hill, B., & Thilakarathna, M. S. (2023). The effect of drought stress on nodulation, plant growth, and nitrogen fixation in soybean during early plant growth. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *209*(3), 345-354. https://doi.org/10.1111/jac.12627

Maksimova, Yu. G., Shchetko, V. A., & Maksimov, A. Yu. (2023). Polymer hydrogels in agriculture (review). *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya*, *58*(1), 23-42. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.1.23eng

Montes Mosquera, M. A. (2016). *Efectos del fosforo y azufre sobre el rendimiento de mazorcas, en una plantación de cacao (Theobroma cacao L.) CCN-51, en la zona de Babahoyo* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica De Babahoyo]. Repositorio Institucional UTB. http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/3358

Matamoros Villon, L. S. (2024). *Uso De NPK de diferentes marcas comerciales durante la etapa de vivero del cultivo de cacao, Los Ríos.* [Tesis de pregrado, Universidad Agraria Del Ecuador]. Archivo digital. https://cia.uagraria.edu.ec/archivos/matamoros%20villon%20luis%20sebastian.pdf

Meilani, R. P., Putra, E. T. S., & Indradewa, D. (2023). Macronutrient contents and yield of cocoa resulting from two different rejuvenation techniques. *Caraka Tani: Journal Of Sustainable Agriculture*, *38*(2), 387-403. https://doi.org/10.20961/carakatani.v38i2.57674

Merchán Pincay, E. K. (2022). *Desarrollo morfológico del cultivo de cacao (Theobroma cacao L.), en etapa de vivero con aplicación de tres fuentes de fertilizante* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal Del Sur De Manabí]. Repositorio Digital UNESUM. https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/4169

Moreno F., L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana, 27 (2), 179-191.* https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012099652009000200006&script=sci_arttext

Narjary, B., Aggarwal, P., Singh, A., Chakraborty, D., & Singh, R. (2012). Water availability in different soils in relation to hydrogel application. *Geoderma*, *187-188*, 94-101. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.002

Paredes Arce, M. (2003). *Manual de cultivo del cacao*. Ministerio de Agricultura, Programa para el Desarrollo de la Amazonía. https://es.slideshare.net/slideshow/manual-cultivo-cacao2003/236329091

Patra, S. K., Poddar, R., Brestic, M., Acharjee, P. U., Bhattacharya, P., Sengupta, S., Pal, P., Bam, N., Biswas, B., Barek, V., Ondrisik, P., Skalicky, M., & Hossain, A. (2022). Prospects of hydrogels in agriculture for enhancing crop and water productivity under water deficit condition. *International Journal of Polymer Science*, *2022(*1*)*, Article 4914836. https://doi.org/10.1155/2022/4914836

Paz-Díaz, H. J., Pacheco-Valderrama, M. M., Aparicio, M. P., Agudelo-Beltrán, A. Y., & Aguirre-Durán, C. (2024). Estudio socioeconómico de las unidades productivas de cacao en San Vicente de Chucurí. *Ingeniería y Competitividad*, *26*(3), Artículo e-21314297. https://doi.org/10.25100/iyc.v26i3.14297

Prasatyio, A. E., Gusniwati, G., Fathia, N. M. E., & Neliyati, N. (2025). Optimization of cacao seedling growth (*Theobroma cacao* L.) through the interaction of asystasia gangetica compost fertilizer and NPK fertilizer. *Biospecies*, *18*(2), 79-85. https://doi.org/10.22437/biospecies.v18i2.44581

Puentes-Páramo, Y. J., Menjivar-Flores, J. C., & Aranzazu-Hernández, F. (2016). Concentración de nutrientes en hojas, una herramienta para el diagnóstico nutricional en cacao. *Agronomía Mesoamericana*, *27*(2), 329. https://doi.org/10.15517/am.v27i2.19728

Quiñones-Cabezas, J. A., Quiñones-Quiñones, J. L., & Ballesteros-Possú, W. (2024). Effect of fertilization on cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings in the southwest of Colombia. *Revista De Ciencias Agrícolas*, *41*(2), Article e2231. https://doi.org/10.22267/rcia.20244102.231

Ramírez Chamorro, L. E., Abaunza González, C. A., Rodríguez Polanco, L., Varón Devia, E. H., & Barragán Quijano, E. (2020). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao) para el departamento del Huila*. Corporación Colombiana De Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7403558

Rodríguez Silva, Y. F. (2013). *Efecto de la aplicación de seis dosis de algas marinas sobre la germinación y características fenotípicas en cacao (Theobroma cacao*

L.) en vivero. [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio Institucional de la Universidad de Guayaquil. https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d38c227a-4880-414f-a281-a835f3486c89/content

Soleimanpour, H., Imani, F., Dolati, S., Soleimanpour, M., & Shahsavarinia, K. (2022). Management of pain using magnesium sulphate: A narrative review. *Postgraduate Medicine*, *134*(3), 260-266. https://doi.org/10.1080/00325481.2022.2035092

Susilo, A. W., Sobir, Wuriandani, A., & Wirnas, D. (2019). Seedling performance of cocoa genotypes (*Theobroma cacao* L.) in drought stress condition. *Pelita Perkebunan (a coffee and cocoa research journal)*, *35*(3), 167-176. https://doi.org/10.22302/iccri.jur.pelitaperkebunan.v35i3.375

Tee, Y. K., Abdul Haadi, H., & Raja Norsharizatul Azira, R. M. S. (2018). Stress tolerance of cacao trees (*Theobroma cacao* L.) subjected to smart water gel. *Transactions of the Malaysian Society of Plant Physiology, 25,* 108-113. https://www.mspp.org.my/files/Transactions%20of%20the%20MSPP%20Vol.%2025.pdf

Velalcázar Rengifo, A. L. (2021). *Efectos en el crecimiento inicial de Gmelina arborea Roxb. probando tres tipos de sustrato en los viveros de la finca experimental "La Represa", año 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio Digital UTEQ. https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6341/1/T-UTEQ-187.pdf

Villasmil Villasmil, R. I., Nava Luzardo, J. C., Portillo Páez, E., & Díaz Barrios, E. (2022). Efecto del manejo agroecológico sobre el crecimiento de plántulas de *Theobroma cacao* L. en fase de vivero. *Revista Técnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*, *45*(1), 16-25. https://doi.org/10.22209/rt.v45n1a02

Wang, Y., Huang, Y., Augusto, L., Goll, D. S., Helfenstein, J., & Hou, E. (2022). Toward a global model for soil inorganic phosphorus dynamics: Dependence of exchange kinetics and soil bioavailability on soil physicochemical properties. *Global Biogeochemical Cycles*, *36*(3), e2021GB007061. https://doi.org/10.1029/2021gb007061

Xian, S., & Webber, M. J. (2020). Temperature-responsive supramolecular hydrogels. *Journal Of Materials Chemistry B*, *8*(40), 9197-9211. https://doi.org/10.1039/d0tb01814g

Yang, D., Wu, B., Qin, X., Zhao, X., Zhu, Z., Yan, L., Zhang, F., Wu, G., & Li, F. (2024). Quality differences and profiling of volatile components between fermented and unfermented cocoa seeds (*Theobroma cacao* L.) of Criollo, Forastero and Trinitario in China. *Beverage plant research*, *4*(1), e002. https://doi.org/10.48130/bpr-0024-0002

Zamora Llanos, E. S., & Pincay Menéndez, J. D. (2024). *Efecto de varias fuentes de sustratos sobre la etapa de germinación y crecimiento de las plántulas de cacao (Theobroma cacao L.)* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal Del Sur De Manabí]. Repositorio Institucional UNESUM. http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/6801

Zewide, I., & Sherefu, A. (2021). Review paper on effect of micronutrients for crop production. *Nutrition and food processing*, *4*(7), 01-08. https://doi.org/10.31579/2637-8914/063

ANEXOS

Figura 9.

Lugar donde se llevó a cabo el experimento



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 10.

Croquis de campo

T4 R1	T3 R4	T5 R3	T2 R1	T1 R2	I
T1 R3	T2 R4	T4 R2	T5 R1	T3 R3	II
T2 R3	T5 R2	T1 R4	T4 R3	T3 R1	III
T5 R4	T2 R2	T4 R4	T3 R2	T1 R1	IV

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 11.

Toma de muestra de arena para análisis de laboratorio



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 12.

Resultados del análisis de la arena utilizada como sustrato



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 13.

Resultados del análisis de la arena utilizada como sustrato



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 14.

Preparación de hidrogel



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 15.

Hidrogel



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 16.

Llenado de fundas de vivero con arena de rio



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 17.

Preparación de semillas de cacao para germinación



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 18.

Semillas germinadas



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 19.

Fertilizantes hidrosolubles utilizados en los tratamientos



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 20.

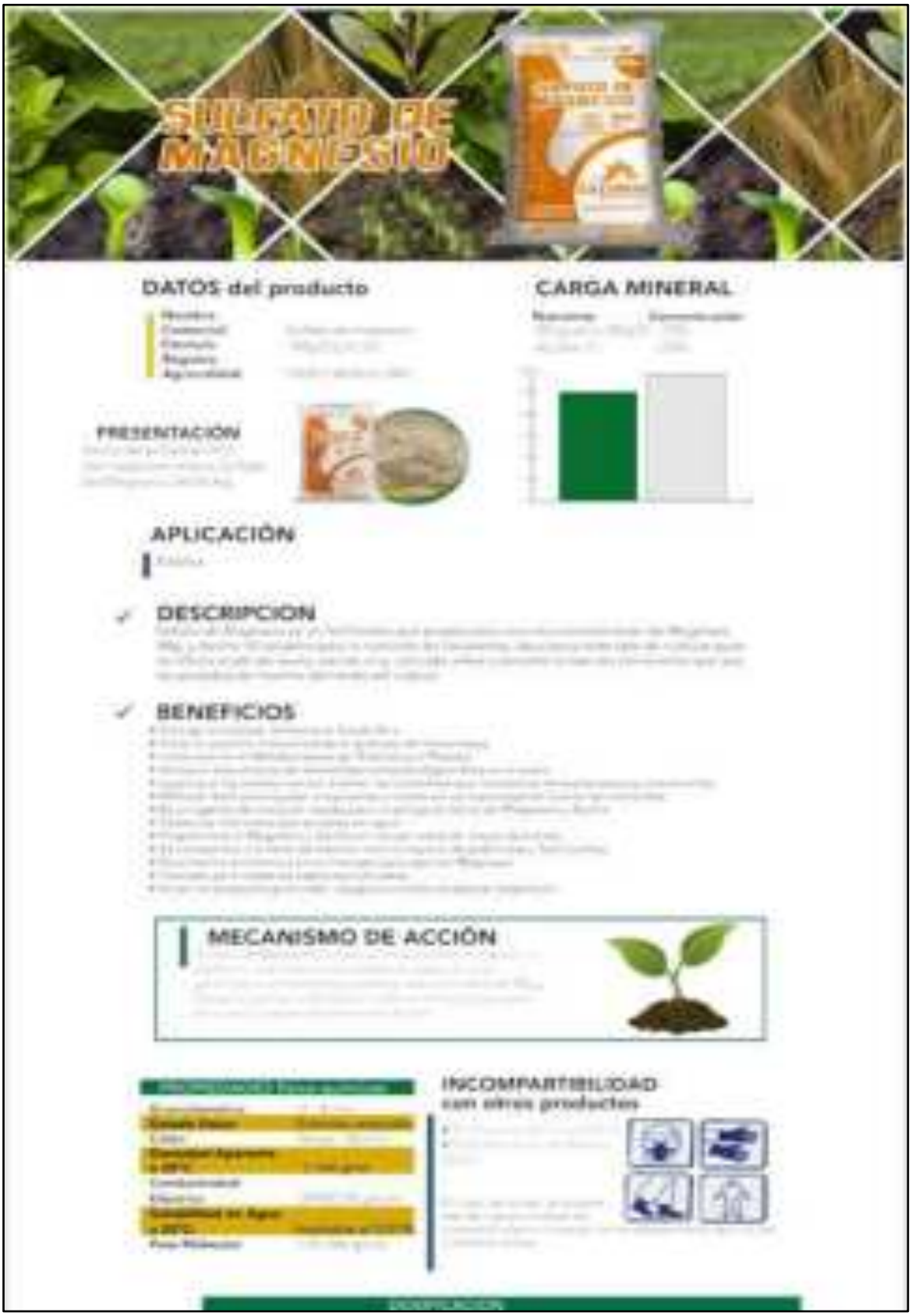
Preparación de la dosis de fertilización por tratamiento



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 21.

Sulfato de magnesio



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 22.

Urea



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 23.

Fosfato diamónico



DAP

18-46-0

Diammonium Phosphate / Fosfato Diamónico

Technical Data Sheet / Ficha de Especificaciones Técnicas

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 24.

Vista general del ensayo a los 30 DDS



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 25.

Seguimiento del ensayo y evaluación de plántulas



Nota: A = Indica tratamiento 2, B = Indica tratamiento 5

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 26.

Aplicación de hidrogel y fertilizantes según los tratamientos



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 27.

Plántulas seleccionadas aleatoriamente



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 28.

Medición de altura y diámetro de las plántulas



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 29.

Plántulas 60 días



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 30.

Plántulas 90 días

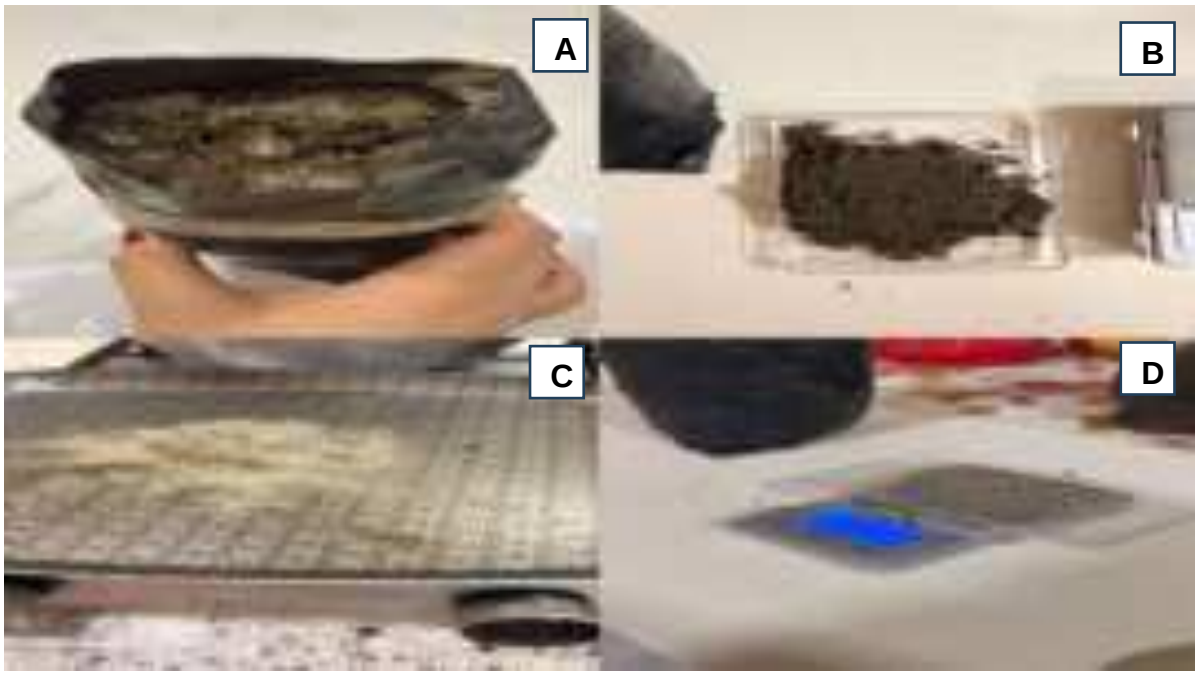


Nota: A = Tratamiento 4, B = Tratamiento 3

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 31.

Determinación del contenido de humedad del sustrato

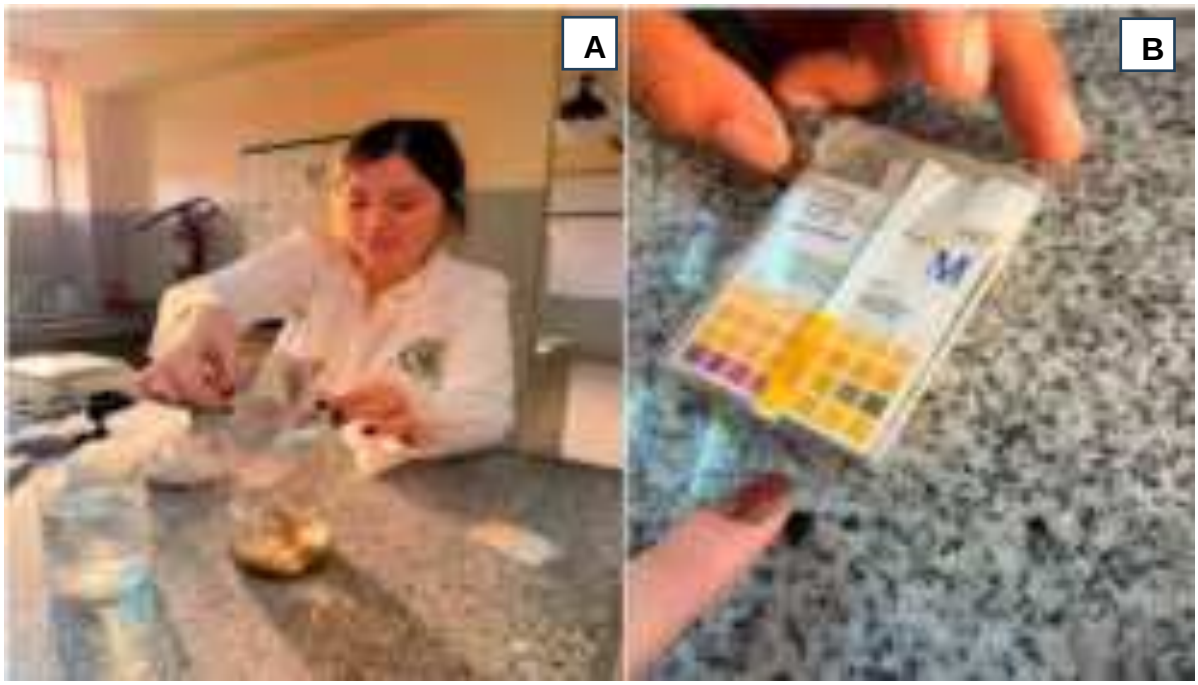


Nota: A = Tratamiento escogido al azar, B = Toma de muestra, C = Sustrato secando en estufa, D = Pesaje de sustrato en seco

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 32.

Determinación del pH del sustrato durante el ensayo



Nota: A = Disolución del sustrato, B = Toma de pH del sustrato

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 33.

Evaluación visual de síntomas de estrés hídrico en plántulas



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 34.

Medición de la altura de la plántula de cacao a los 90 DDS



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 35.

Medición de diámetro de la plántula de cacao a los 90 DDS



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 36.

Medición de longitud de la raíz principal a los 90 DDS



Elaborado por: La autora, 2026}

Figura 37*.*

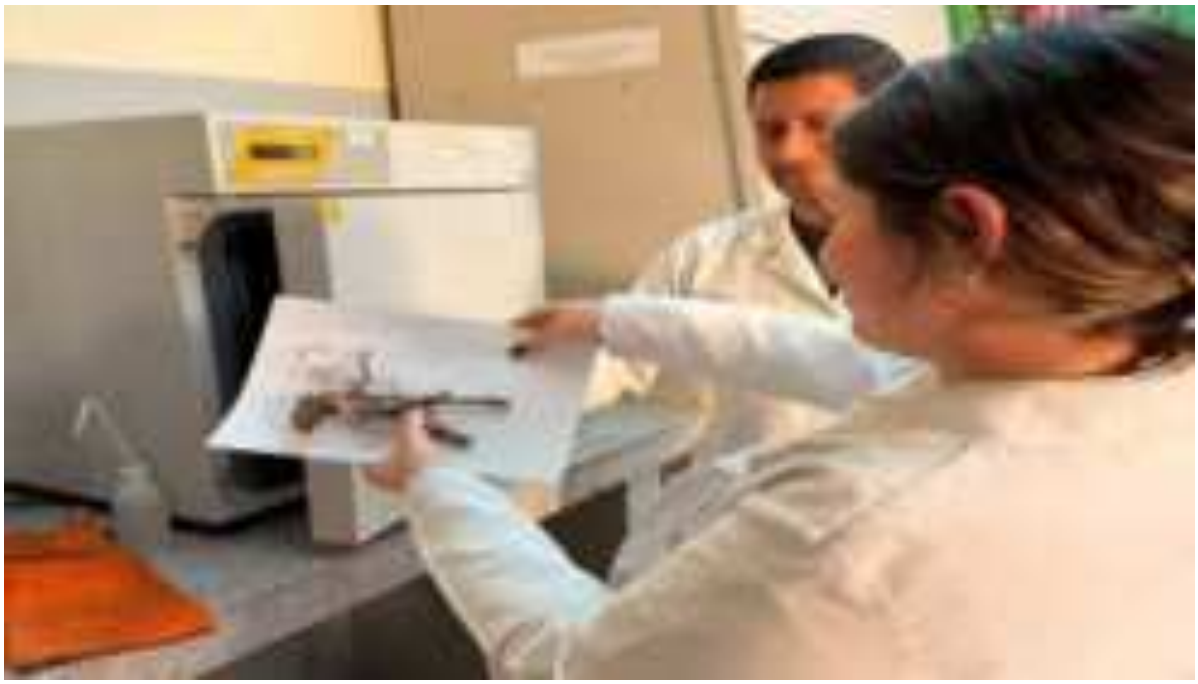
Determinación del peso fresco de raíces



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 38.

Secado de raíces para la determinación de biomasa seca



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 39.

Recolección de muestras foliares para análisis de nutrientes



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 40.

Vivero completo



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 41.

Análisis foliar T1-60



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 42.

Análisis T1-90



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 43.

Análisis foliar T2-60



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 44.

Análisis foliar T2-90



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 45.

Análisis foliar T3-60



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 46.

Análisis foliar T3-90



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 47.

Análisis foliar T4-60



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 48.

Análisis foliar T4-90



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 49.

Análisis foliar T5-60



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 50.

Análisis foliar T5-90



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 51.

Análisis de varianza altura de planta 30 días

Variable N R² R² Aj
CV Altura 30D 20 0,96
0,94 3,75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	93,56	7	13,37	42,99	<0,0001
Bloque	13,27	3	4,42	14,23	0,0003
Tratamiento	80,29	4	20,07	64,56	<0,0001
Error	3,73	12	0,31		
Total	97,29	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,04699
Error: 0,3109 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
3	15,74	5	0,25	A	
4	15,51	5	0,25	A	B
2	14,47	5	0,25		B C
1	13,72	5	0,25		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,25673
Error: 0,3109 gl: 12

Tratamiento	Medias	n	E.E.		
T1	15,20	4	0,28		B
T3	15,00	4	0,28		B
T2	14,80	4	0,28		B
T4	11,30	4	0,28		C

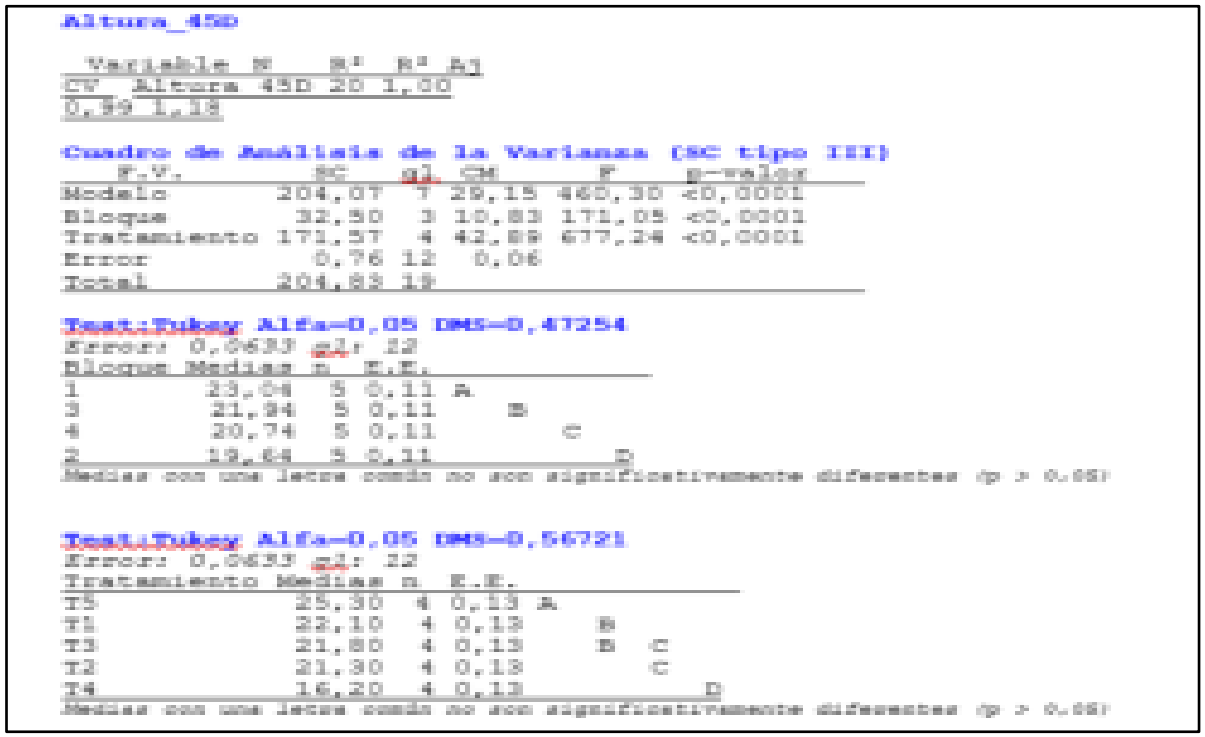
T5 17,80 4 0,28 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 52.

Análisis de varianza altura de planta 45 días



```
Altura_45D

  Variable  N   R²  R² Aj
CV  Altura 45D 20 1,00
0,89 1,18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
   F.V.         SC    gl  CM      F      p-valor
Modelo       204,07  7 29,15 460,30 <0,0001
Bloque        32,50  3 10,83 171,05 <0,0001
Tratamiento  171,57  4 42,89 677,24 <0,0001
Error          0,76 12  0,06
Total        204,83 19

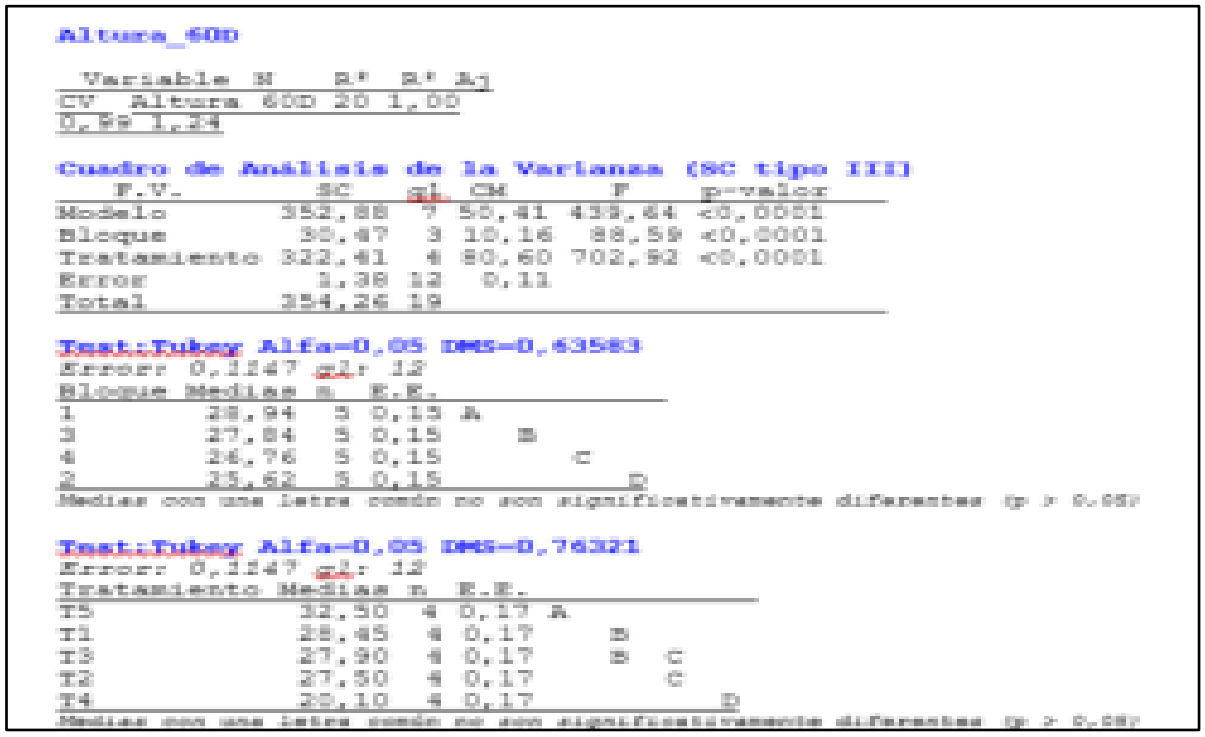
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,47254
Error: 0,0633 gl: 12
Bloque Medias n  E.E.
1      23,04  5 0,11 A
3      21,94  5 0,11    B
4      20,74  5 0,11       C
2      19,64  5 0,11          D
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)


Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,56721
Error: 0,0633 gl: 12
Tratamiento Medias n  E.E.
T5          25,30  4 0,13 A
T1          22,10  4 0,13    B
T3          21,80  4 0,13    B  C
T2          21,30  4 0,13       C
T4          16,20  4 0,13          D
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)
```

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 53.

Análisis de varianza altura de planta 60 días



```
Altura_60D

  Variable  N   R²  R² Aj
CV  Altura 60D 20 1,00
0,89 1,34

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
   F.V.         SC    gl  CM      F      p-valor
Modelo       352,88  7 50,41 438,64 <0,0001
Bloque        30,47  3 10,16  88,59 <0,0001
Tratamiento  322,41  4 80,60 702,92 <0,0001
Error          1,38 12  0,11
Total        354,26 19

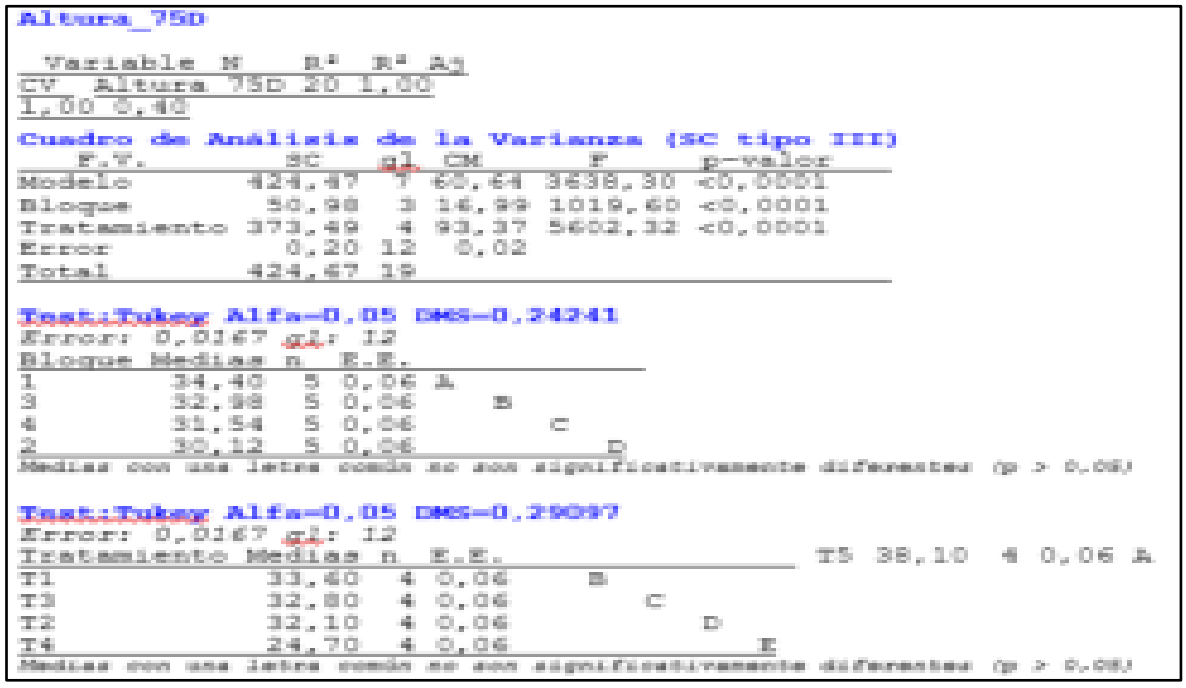
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,63583
Error: 0,1147 gl: 12
Bloque Medias n  E.E.
1      28,94  5 0,15 A
3      27,84  5 0,15    B
4      26,76  5 0,15       C
2      25,62  5 0,15          D
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,76321
Error: 0,1147 gl: 12
Tratamiento Medias n  E.E.
T5          32,50  4 0,17 A
T1          28,45  4 0,17    B
T3          27,90  4 0,17    B  C
T2          27,50  4 0,17       C
T4          20,10  4 0,17          D
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)
```

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 54.

Análisis de varianza altura de planta 75 días



```
Altura_75D

  Variable  N    R²  R² Aj
CV  Altura 75D 20 1,00
1,00 0,40

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
    F.V.          SC    gl  CM       F       p-valor
Modelo         424,47  7  60,64 3638,30 <0,0001
Bloque          50,98  3  16,99 1019,60 <0,0001
Tratamiento    373,49  4  93,37 5602,32 <0,0001
Error            0,20 12   0,02
Total          424,67 19

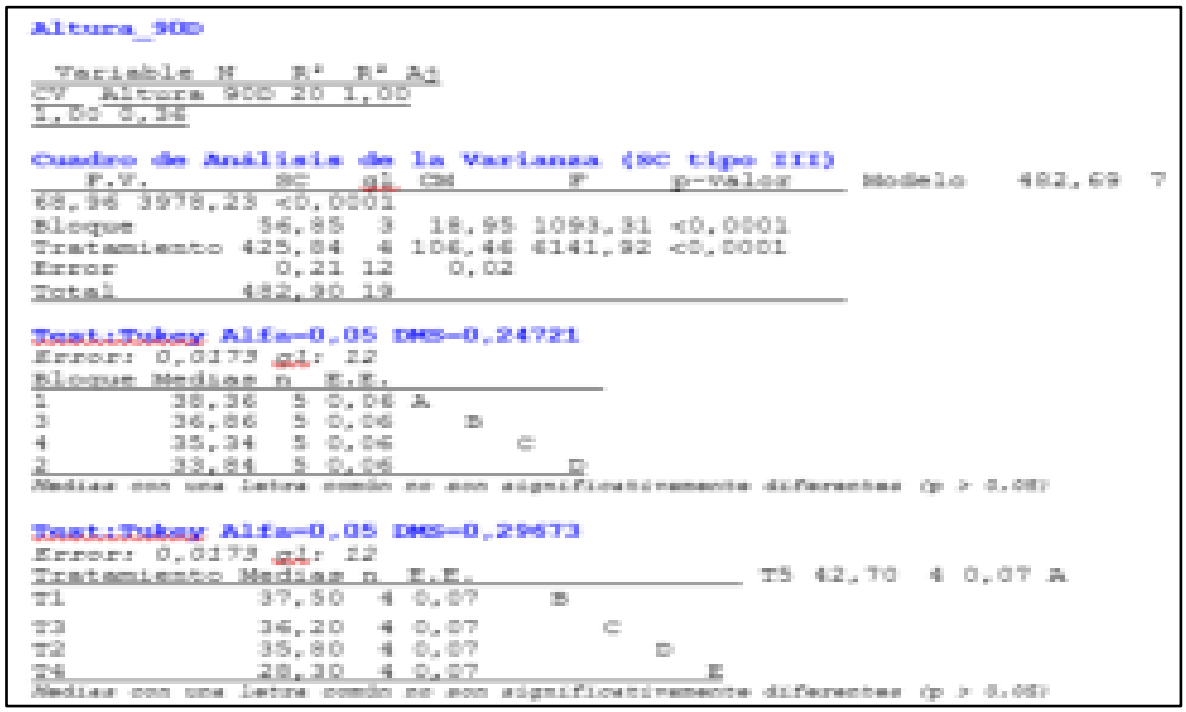
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,24241
Error: 0,0167 gl: 12
Bloque Medias n  E.E.
1      34,40  5 0,06 A
3      32,98  5 0,06    B
4      31,54  5 0,06       C
2      30,12  5 0,06          D
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,29097
Error: 0,0167 gl: 12
Tratamiento Medias n  E.E.                    T5  38,10  4 0,06 A
T1          33,60  4 0,06    B
T3          32,80  4 0,06       C
T2          32,10  4 0,06          D
T4          24,70  4 0,06             E
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)
```

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 55.

Análisis de varianza altura de planta 90 días



```
Altura_90D

  Variable  N    R²  R² Aj
CV  Altura 90D 20 1,00
1,00 0,36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
    F.V.          SC    gl  CM       F       p-valor    Modelo    482,69  7
68,96 3978,23 <0,0001
Bloque          56,85  3  18,95 1093,31 <0,0001
Tratamiento    425,84  4 106,46 6141,92 <0,0001
Error            0,21 12   0,02
Total          482,90 19

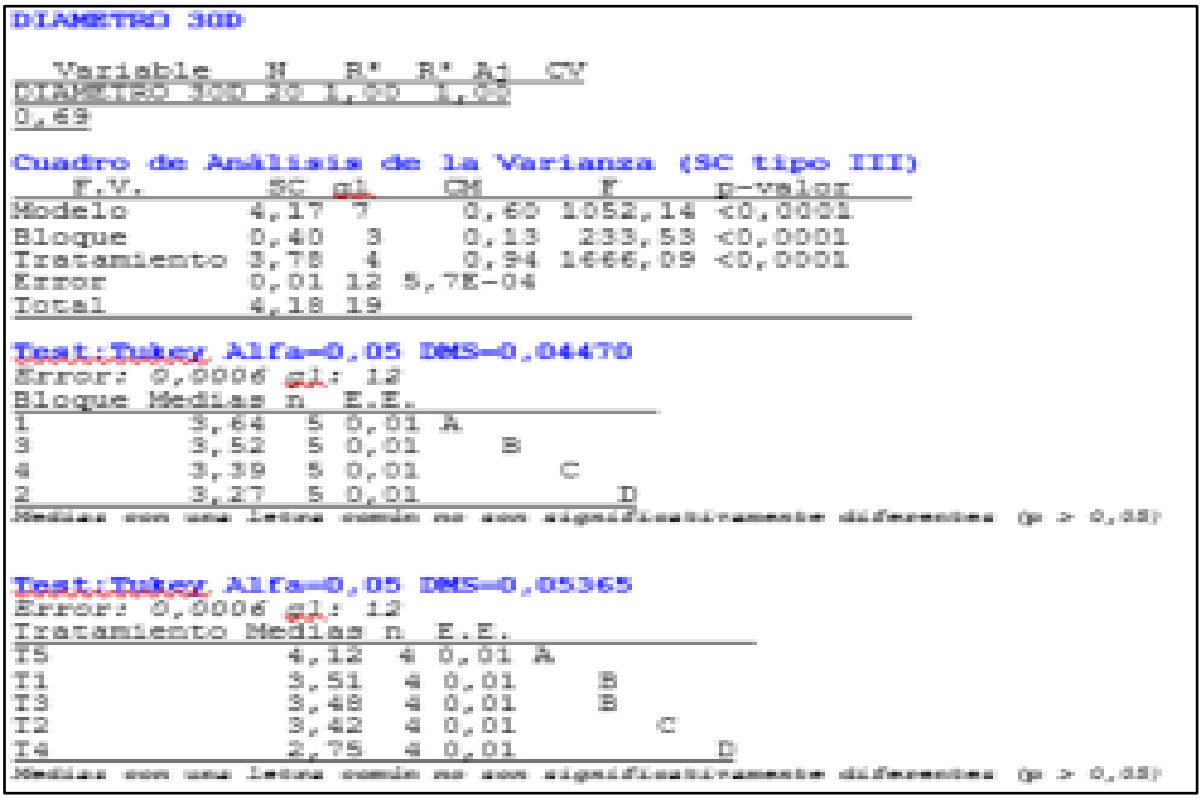
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,24721
Error: 0,0173 gl: 12
Bloque Medias n  E.E.
1      38,36  5 0,06 A
3      36,86  5 0,06    B
4      35,34  5 0,06       C
2      33,84  5 0,06          D
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,29673
Error: 0,0173 gl: 12
Tratamiento Medias n  E.E.                    T5  42,70  4 0,07 A
T1          37,50  4 0,07    B
T3          36,20  4 0,07       C
T2          35,80  4 0,07          D
T4          28,30  4 0,07             E
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)
```

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 56.

Diámetro del tallo 30 días



DIAMETRO 30D

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DIAMETRO 30D	20	1,00	1,00	0,69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4,17	7	0,60	1052,14	<0,0001
Bloque	0,40	3	0,13	233,53	<0,0001
Tratamiento	3,78	4	0,94	1666,09	<0,0001
Error	0,01	12	5,7E-04		
Total	4,18	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,04470

Error: 0,0006 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	3,64	5	0,01	A	
3	3,52	5	0,01		B
4	3,39	5	0,01		C
2	3,27	5	0,01		D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,05365

Error: 0,0006 gl: 12

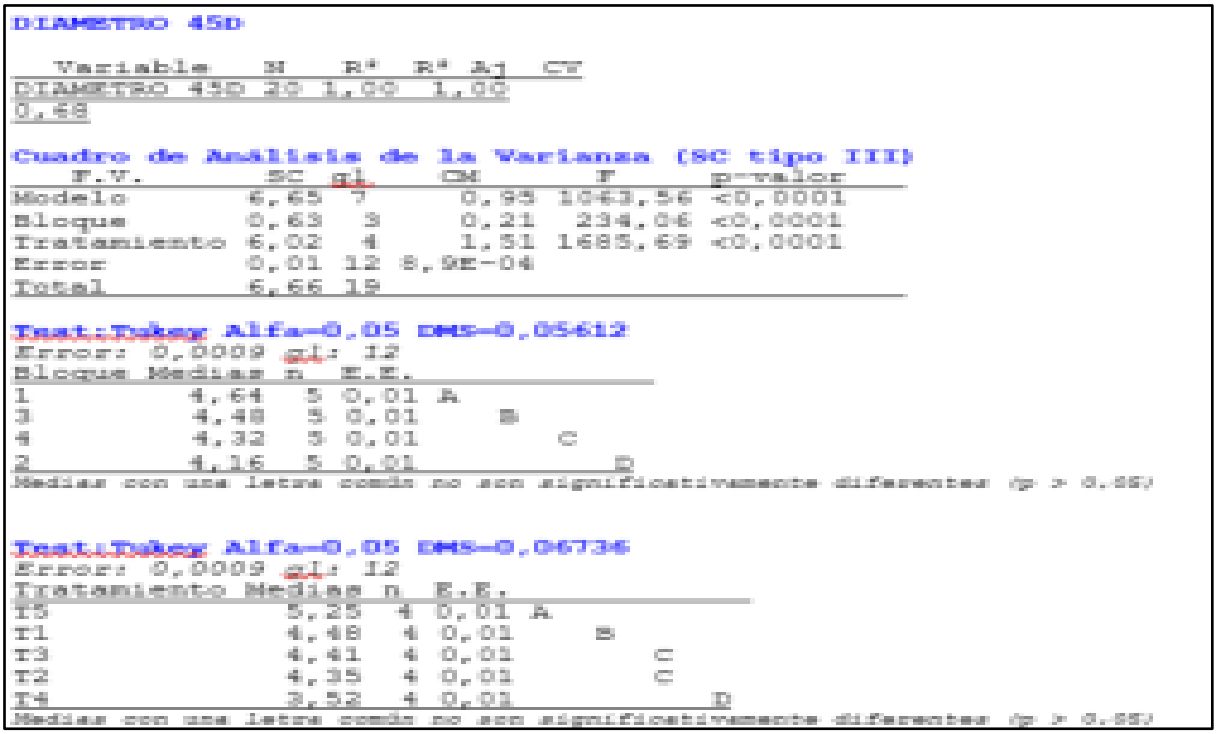
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	4,12	4	0,01	A		
T1	3,51	4	0,01		B	
T3	3,48	4	0,01		B	
T2	3,42	4	0,01			C
T4	2,75	4	0,01			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 57.

Diámetro del tallo 45 días



DIAMETRO 45D

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DIAMETRO 45D	20	1,00	1,00	0,68

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6,65	7	0,95	1063,56	<0,0001
Bloque	0,63	3	0,21	234,06	<0,0001
Tratamiento	6,02	4	1,51	1685,69	<0,0001
Error	0,01	12	8,9E-04		
Total	6,66	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,05612

Error: 0,0009 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	4,64	5	0,01	A	
3	4,48	5	0,01		B
4	4,32	5	0,01		C
2	4,16	5	0,01		D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,06736

Error: 0,0009 gl: 12

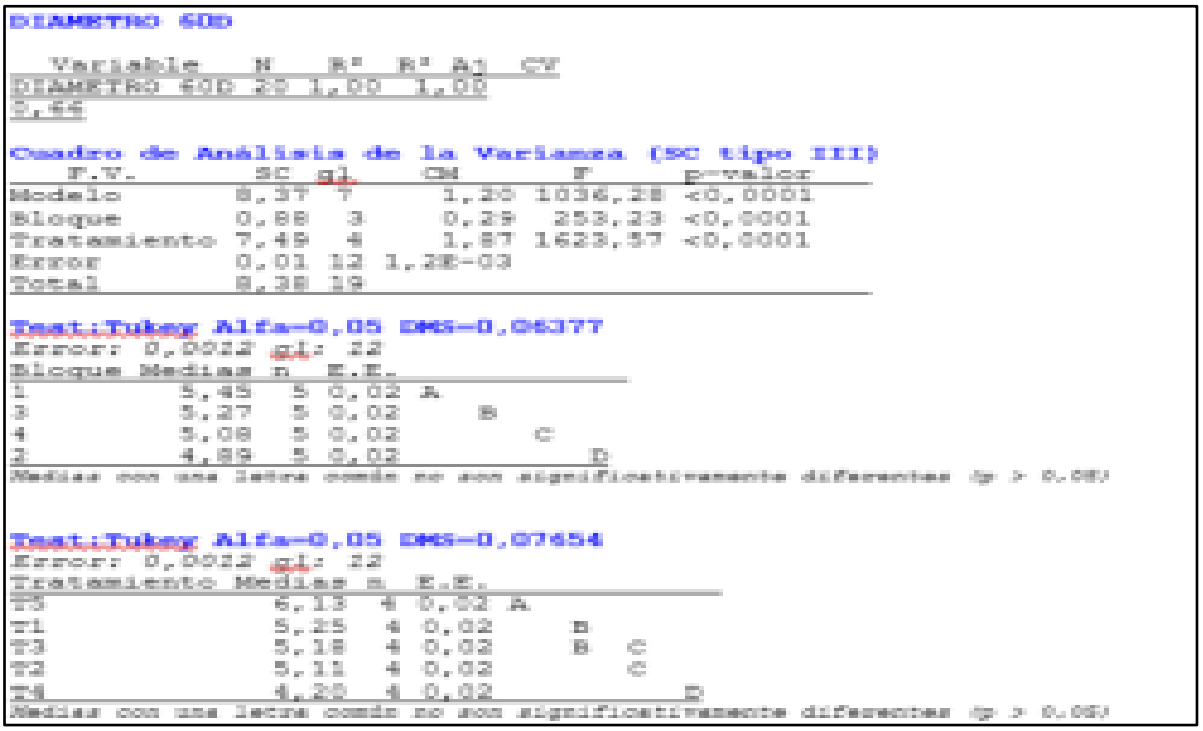
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	5,25	4	0,01	A		
T1	4,48	4	0,01		B	
T3	4,41	4	0,01			C
T2	4,35	4	0,01			C
T4	3,52	4	0,01			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 58.

Diámetro del tallo 60 días



DIAMETRO 60D

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DIAMETRO 60D	20	1,00	1,00	2,55

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8,37	7	1,20	1036,28	<0,0001
Bloque	0,88	3	0,29	253,23	<0,0001
Tratamiento	7,49	4	1,87	1623,57	<0,0001
Error	0,01	12	1,2E-03		
Total	8,38	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,06377

Error: 0,0012 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	5,45	5	0,02	A	
3	5,27	5	0,02		B
4	5,08	5	0,02		C
2	4,89	5	0,02		D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,07454

Error: 0,0012 gl: 12

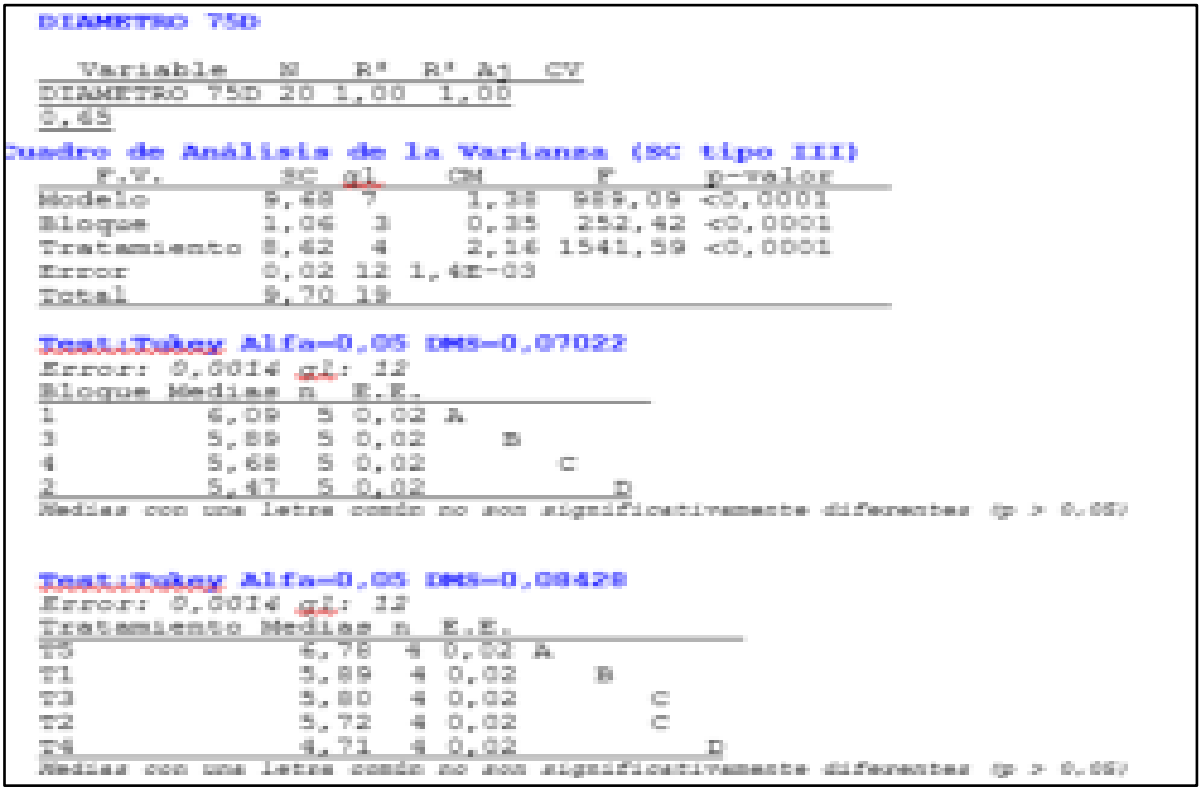
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	6,13	4	0,02	A		
T1	5,25	4	0,02		B	
T3	5,18	4	0,02		B	C
T2	5,11	4	0,02			C
T4	4,20	4	0,02			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 59.

Diámetro del tallo 75 días



DIAMETRO 75D

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DIAMETRO 75D	20	1,00	1,00	2,45

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9,48	7	1,38	989,09	<0,0001
Bloque	1,06	3	0,35	252,42	<0,0001
Tratamiento	8,42	4	2,16	1541,59	<0,0001
Error	0,02	12	1,4E-03		
Total	9,70	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,07022

Error: 0,0014 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	6,09	5	0,02	A	
3	5,89	5	0,02		B
4	5,68	5	0,02		C
2	5,47	5	0,02		D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08428

Error: 0,0014 gl: 12

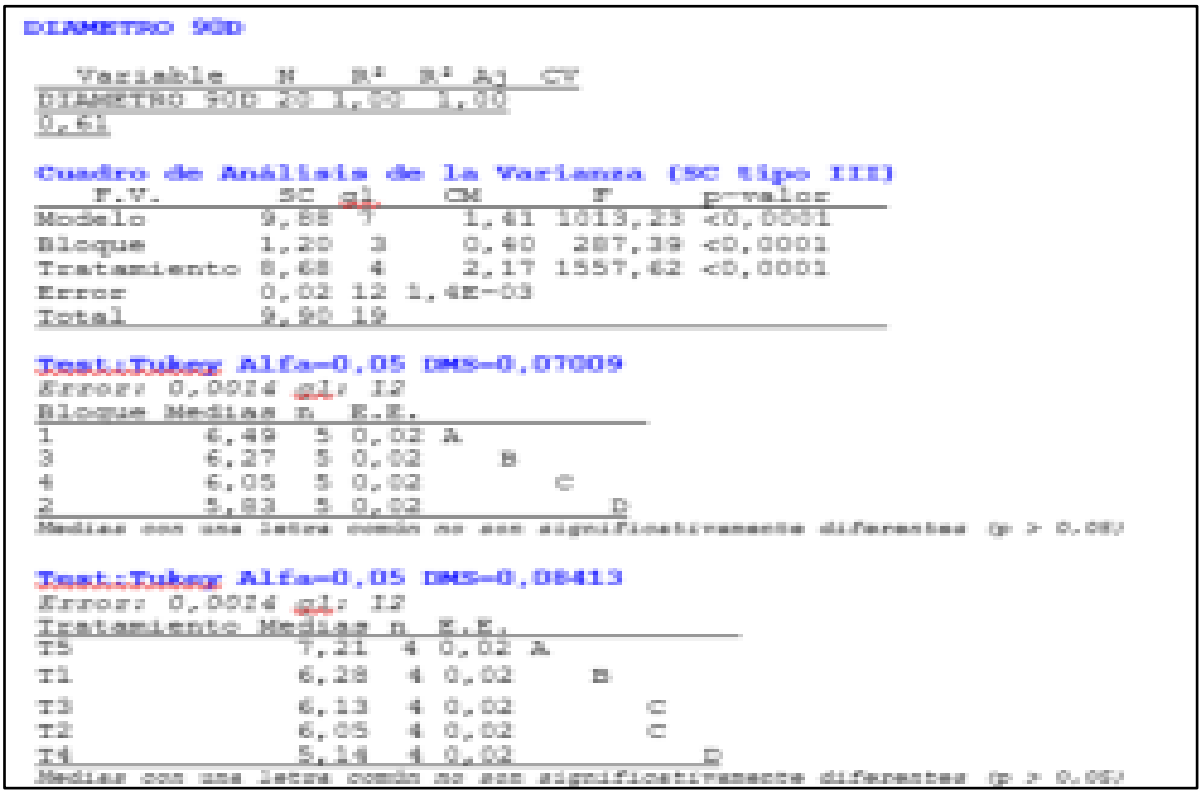
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	6,78	4	0,02	A		
T1	5,89	4	0,02		B	
T3	5,80	4	0,02			C
T2	5,72	4	0,02			C
T4	4,71	4	0,02			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 60.

Diámetro del tallo 90 días



DIAMETRO 90D

Variable	N	R²	R² Aj	CV
DIAMETRO 90D	20	1,00	1,00	0,61

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9,88	7	1,41	1013,23	<0,0001
Bloque	1,20	3	0,40	287,39	<0,0001
Tratamiento	8,68	4	2,17	1557,62	<0,0001
Error	0,02	12	1,4E-03		
Total	9,90	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,07009

Error: 0,0014 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.			
1	6,49	5	0,02	A		
3	6,27	5	0,02		B	
4	6,05	5	0,02			C
2	5,83	5	0,02			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08413

Error: 0,0014 gl: 12

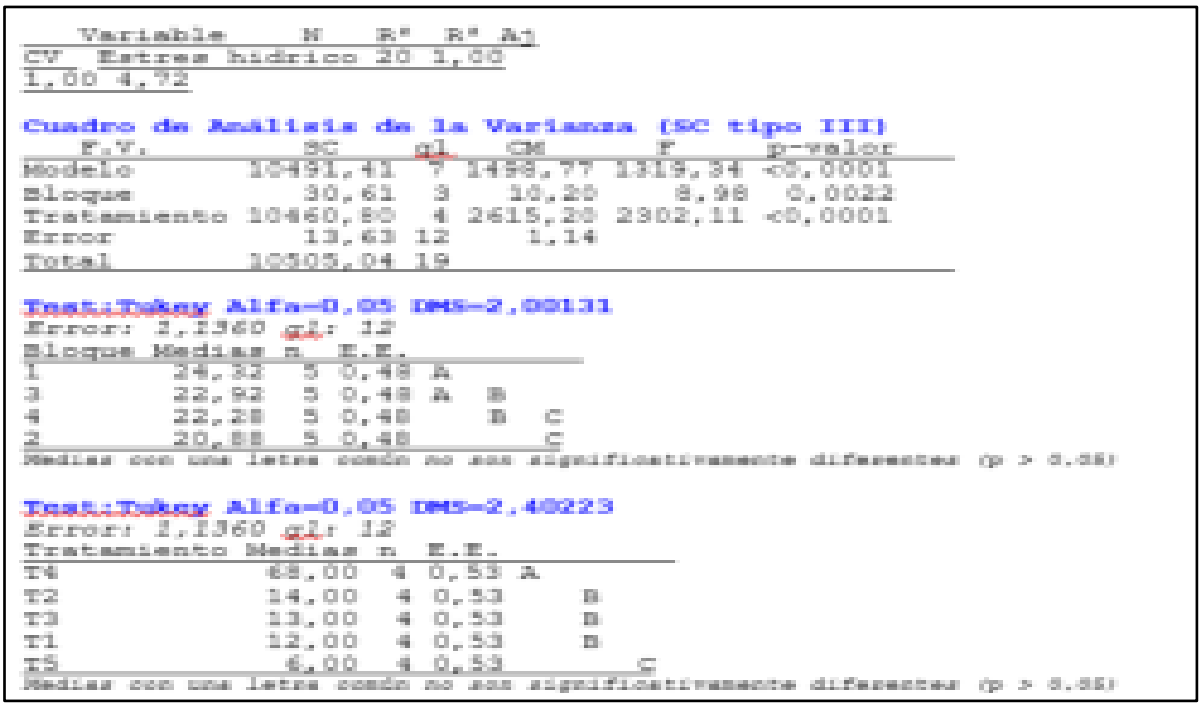
Tratamiento	Medias	n	E.E.				
T5	7,21	4	0,02	A			
T1	6,28	4	0,02		B		
T3	6,13	4	0,02			C	
T2	6,05	4	0,02			C	
T4	5,14	4	0,02				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 61.

Estrés hídrico



Variable	N	R²	R² Aj	CV
Estres hidrico	20	1,00	1,00	4,72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10491,41	7	1498,77	1319,34	<0,0001
Bloque	30,61	3	10,20	8,98	0,0022
Tratamiento	10460,80	4	2615,20	2302,11	<0,0001
Error	13,63	12	1,14		
Total	10505,04	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,00131

Error: 1,1360 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.			
1	24,32	5	0,48	A		
3	22,92	5	0,48	A	B	
4	22,28	5	0,48		B	C
2	20,88	5	0,48			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,40223

Error: 1,1360 gl: 12

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T4	68,00	4	0,53	A		
T2	14,00	4	0,53		B	
T3	13,00	4	0,53		B	
T1	12,00	4	0,53		B	
T5	6,00	4	0,53			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 62.

Humedad 30 días



HUMEDAD 30_DDT

Variable	N	R²	R² Aj
CV HUMEDAD	30	DDT	20 1,00
0,99 1,20			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	147,18	7	21,03	438,05	<0,0001
Bloque	12,06	3	4,02	83,78	<0,0001
Tratamiento	135,12	4	33,78	703,75	<0,0001
Error	0,58	12	0,05		
Total	147,76	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,41138

Error: 0,0480 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	19,38	5	0,10	A	
3	18,50	5	0,10		B
4	18,10	5	0,10		B
2	17,22	5	0,10		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,49379

Error: 0,0480 gl: 12

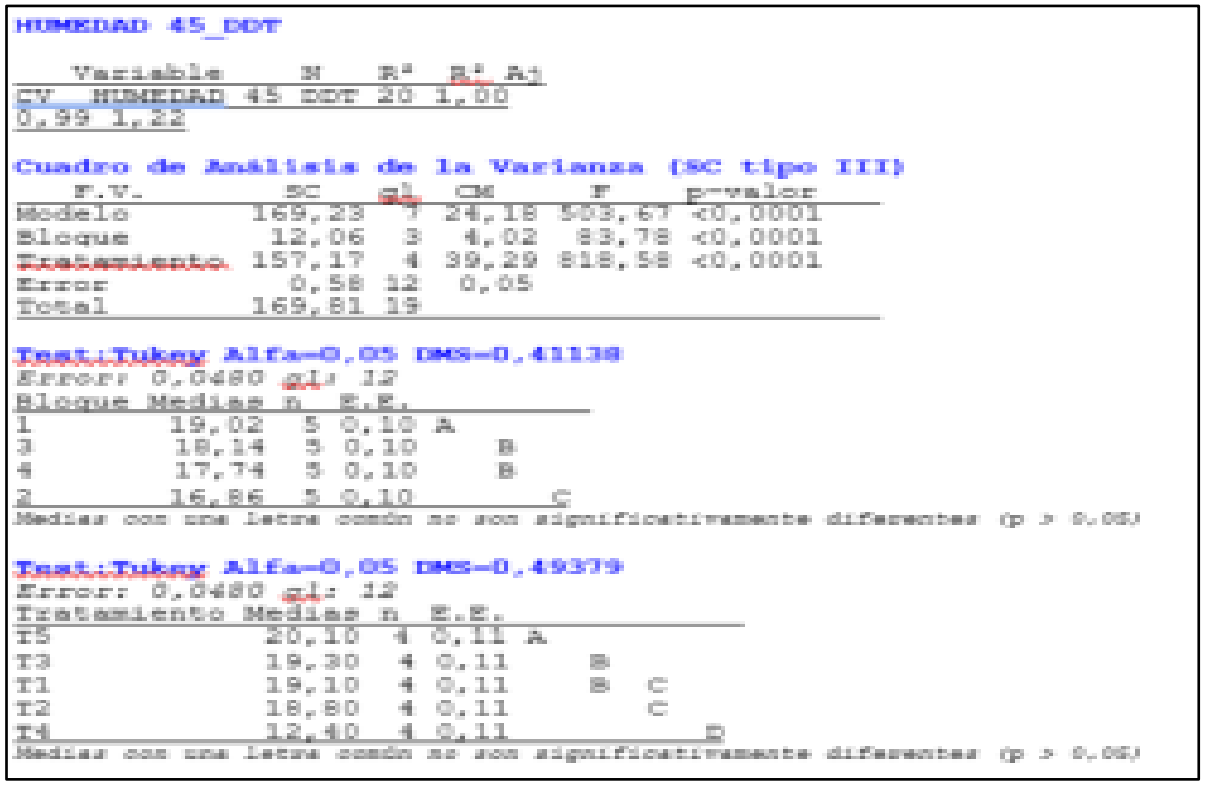
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	20,50	4	0,11	A		
T3	19,50	4	0,11		B	
T1	19,30	4	0,11		B	C
T2	19,00	4	0,11			C
T4	13,20	4	0,11			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 63.

Humedad 45 días



HUMEDAD 45_DDT

Variable	N	R²	R² Aj
CV HUMEDAD	45	DDT	20 1,00
0,99 1,22			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	169,23	7	24,18	503,67	<0,0001
Bloque	12,06	3	4,02	83,78	<0,0001
Tratamiento	157,17	4	39,29	818,58	<0,0001
Error	0,58	12	0,05		
Total	169,81	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,41138

Error: 0,0480 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	19,02	5	0,10	A	
3	18,14	5	0,10		B
4	17,74	5	0,10		B
2	16,86	5	0,10		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,49379

Error: 0,0480 gl: 12

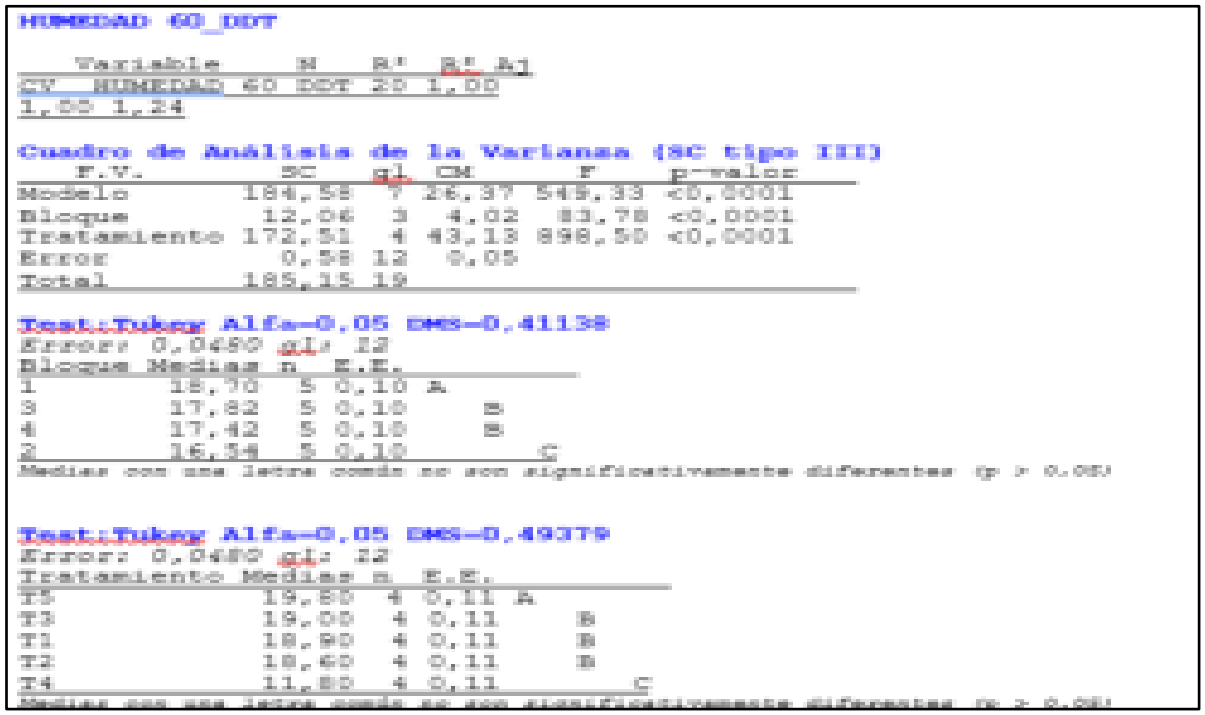
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	20,10	4	0,11	A		
T3	19,30	4	0,11		B	
T1	19,10	4	0,11		B	C
T2	18,80	4	0,11			C
T4	12,40	4	0,11			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 64.

Humedad 60 días



```
HUMEDAD 60_DDT

   Variable     N   R²  R² Aj
CV HUMEDAD 60 DDT 20 1,00
1,00 1,24

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
   F.V.         SC     gl  CM      F      p-valor
Modelo       184,58   7 26,37 549,33 <0,0001
Bloque        12,06   3  4,02  83,78 <0,0001
Tratamiento  172,51   4 43,13 898,50 <0,0001
Error          0,58  12  0,05
Total        185,15  19

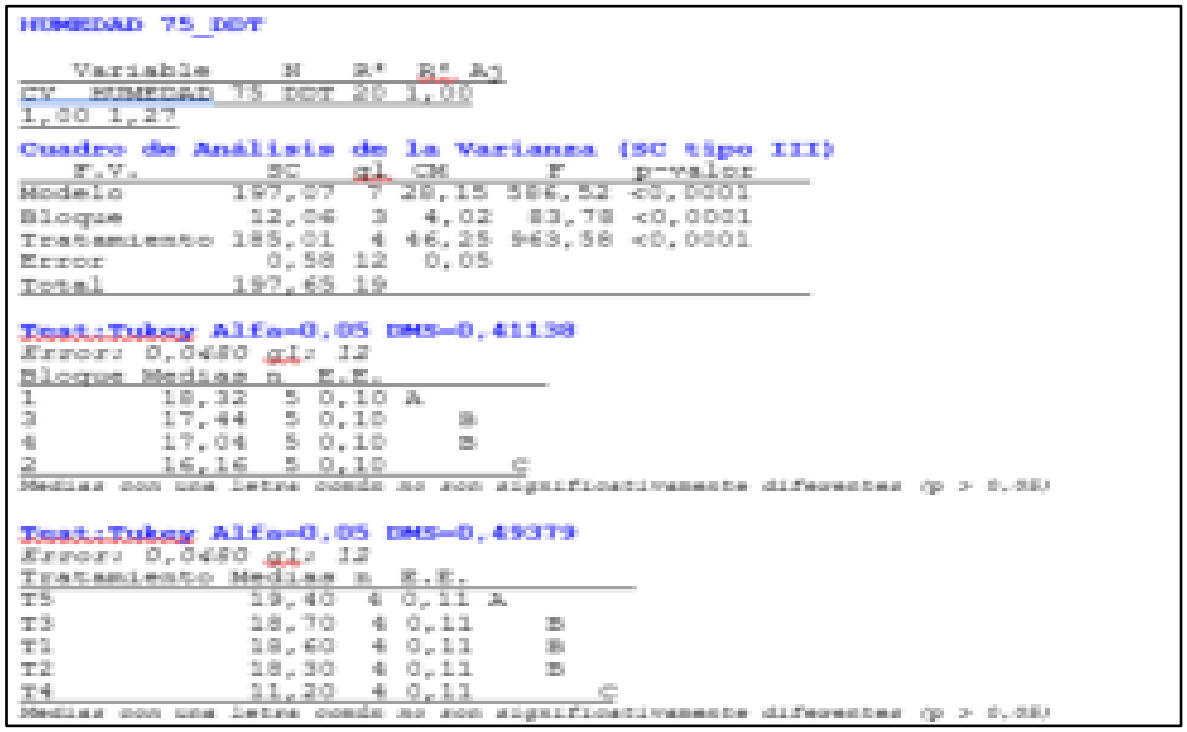
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,41138
Error: 0,0480 gl: 12
Bloque Medias n  E.E.
1      18,70  5 0,10 A
3      17,82  5 0,10    B
4      17,42  5 0,10    B
2      16,34  5 0,10       C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)


Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,49379
Error: 0,0480 gl: 12
Tratamiento Medias n  E.E.
T5          19,80  4 0,11 A
T3          19,00  4 0,11    B
T1          18,90  4 0,11    B
T2          18,60  4 0,11    B
T4          11,80  4 0,11       C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)
```

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 65.

Humedad 75 días



```
HUMEDAD 75_DDT

   Variable     N   R²  R² Aj
CV HUMEDAD 75 DDT 20 1,00
1,00 1,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)
   F.V.         SC     gl  CM      F      p-valor
Modelo       197,07   7 28,15 586,52 <0,0001
Bloque        12,06   3  4,02  83,78 <0,0001
Tratamiento  185,01   4 46,25 963,58 <0,0001
Error          0,58  12  0,05
Total        197,65  19

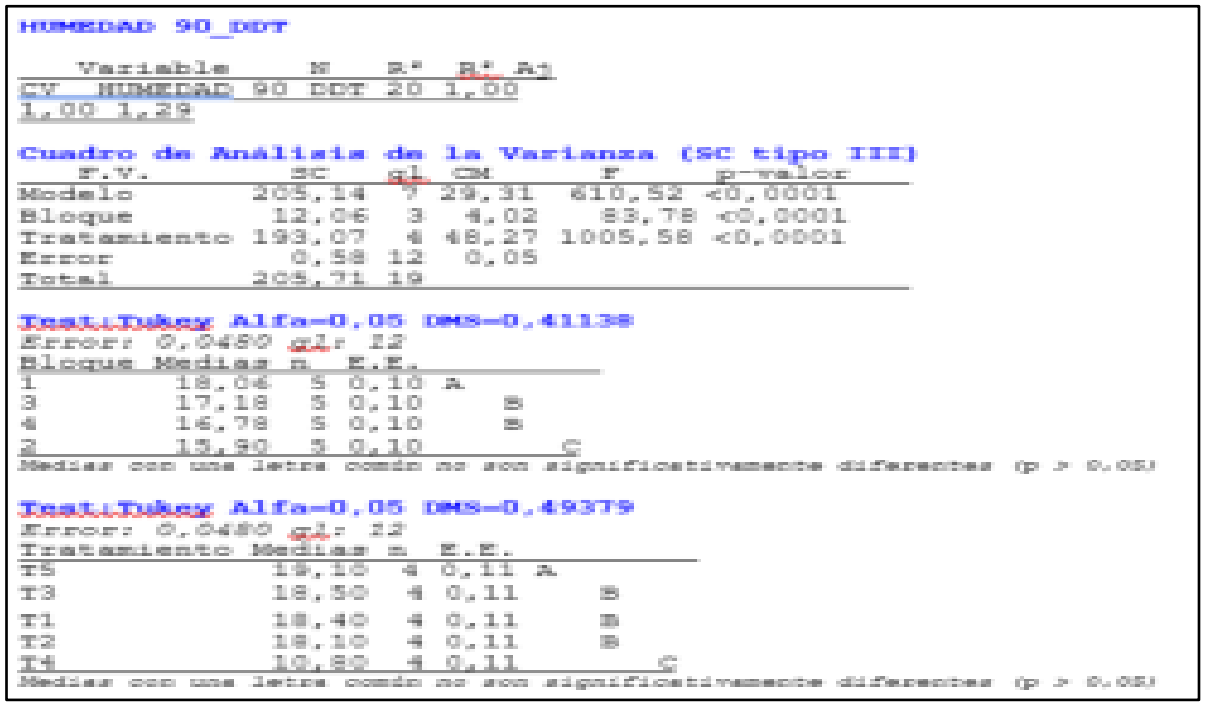
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,41138
Error: 0,0480 gl: 12
Bloque Medias n  E.E.
1      18,32  5 0,10 A
3      17,44  5 0,10    B
4      17,04  5 0,10    B
2      16,16  5 0,10       C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,49379
Error: 0,0480 gl: 12
Tratamiento Medias n  E.E.
T5          19,40  4 0,11 A
T3          18,70  4 0,11    B
T1          18,60  4 0,11    B
T2          18,30  4 0,11    B
T4          11,20  4 0,11       C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)
```

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 66.

Humedad 90 días



HUMEDAD 90_DDT

Variable	N	R²	R² Aj	CV
HUMEDAD 90 DDT	20	1,00	1,00	0,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	205,14	7	29,31	610,52	<0,0001
Bloque	12,06	3	4,02	83,78	<0,0001
Tratamiento	193,07	4	48,27	1005,58	<0,0001
Error	0,58	12	0,05		
Total	205,71	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,41138

Error: 0,0480 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	18,06	5	0,10	A	
3	17,18	5	0,10		B
4	16,78	5	0,10		B
2	13,90	5	0,10		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,49379

Error: 0,0480 gl: 12

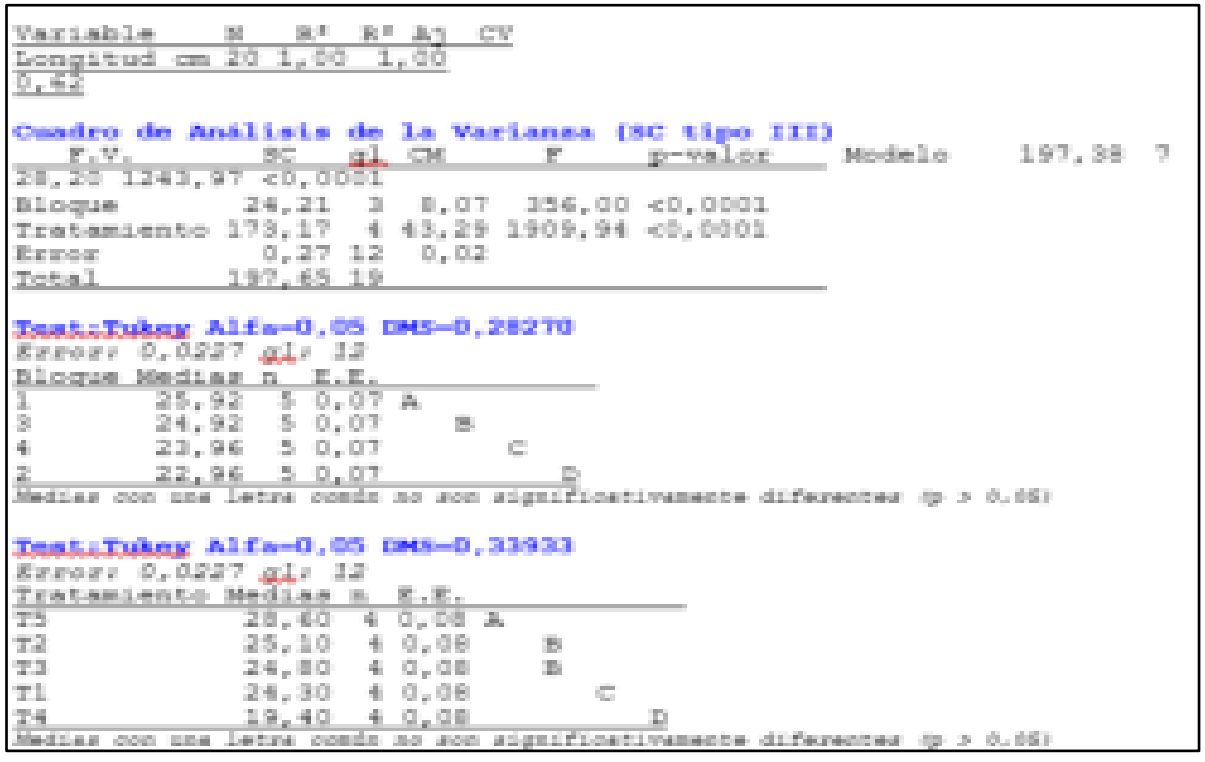
Tratamiento	Medias	n	E.E.		
T5	19,15	4	0,11	A	
T3	18,50	4	0,11		B
T1	18,40	4	0,11		B
T2	18,10	4	0,11		B
T4	10,80	4	0,11		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 67.

Longitud



Variable	N	R²	R² Aj	CV
Longitud cm	20	1,00	1,00	0,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	197,38	7	28,20	1243,97	<0,0001
Bloque	24,21	3	8,07	356,00	<0,0001
Tratamiento	173,17	4	43,29	1909,94	<0,0001
Error	0,27	12	0,02		
Total	197,65	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,28270

Error: 0,0227 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.			
1	25,92	5	0,07	A		
3	24,92	5	0,07		B	
4	23,96	5	0,07			C
2	22,96	5	0,07			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,33933

Error: 0,0227 gl: 12

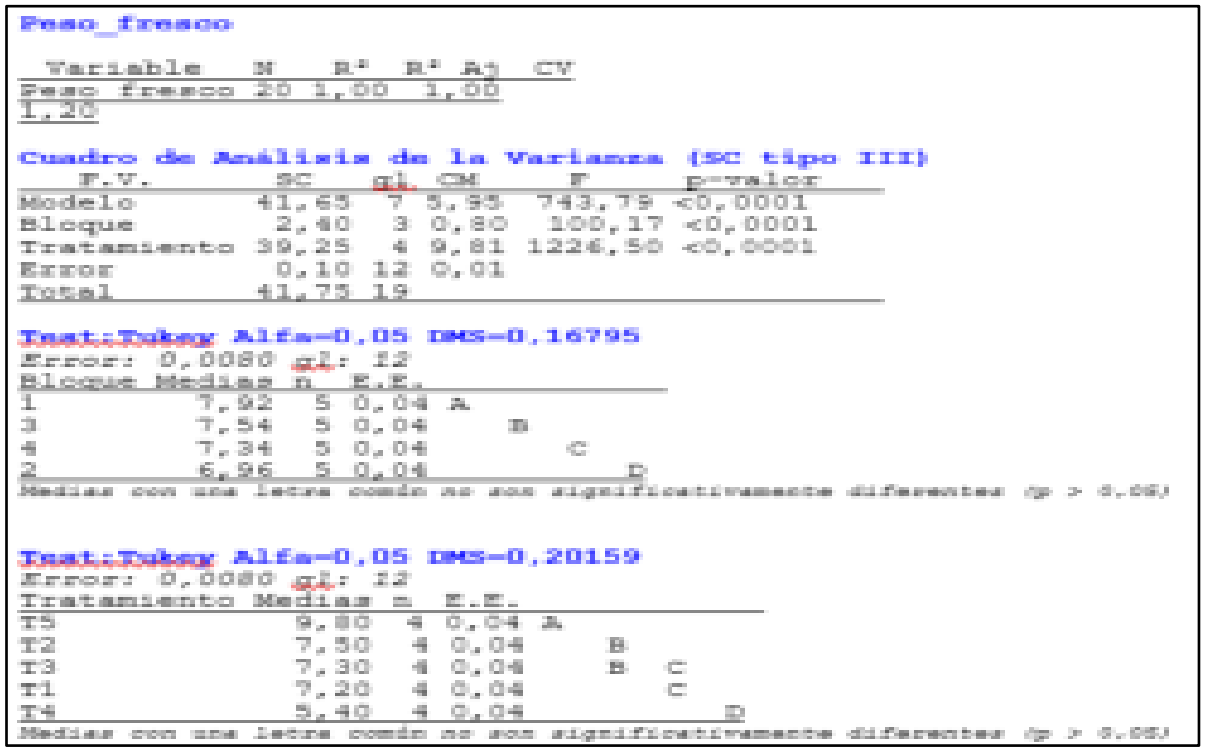
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	28,60	4	0,08	A		
T2	25,10	4	0,08		B	
T3	24,80	4	0,08		B	
T1	24,30	4	0,08			C
T4	19,40	4	0,08			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 68.

Peso Fresco



Peso_fresco

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Peso fresco	20	1,00	1,00	1,20

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	41,65	7	5,95	743,79	<0,0001
Bloque	2,40	3	0,80	100,17	<0,0001
Tratamiento	39,25	4	9,81	1226,50	<0,0001
Error	0,10	12	0,01		
Total	41,75	19			

Inat:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,16795

Error: 0,0080 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	7,92	5	0,04	A	
3	7,54	5	0,04		B
4	7,34	5	0,04		C
2	6,96	5	0,04		D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Inat:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,20159

Error: 0,0080 gl: 12

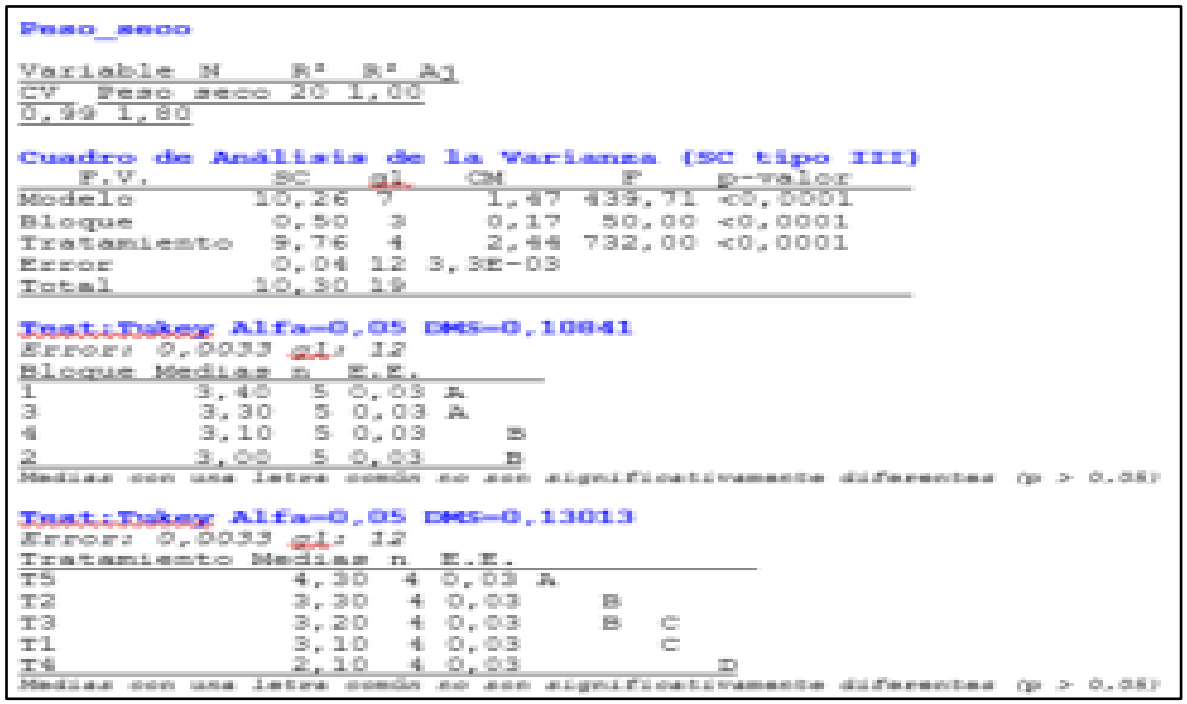
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	9,80	4	0,04	A		
T2	7,50	4	0,04		B	
T3	7,30	4	0,04		B	C
T1	7,20	4	0,04			C
T4	5,40	4	0,04			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 69.

Peso seco



Peso_seco

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Peso seco	20	1,00		0,99 1,80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10,26	7	1,47	439,71	<0,0001
Bloque	0,50	3	0,17	50,00	<0,0001
Tratamiento	9,76	4	2,44	732,00	<0,0001
Error	0,04	12	3,3E-03		
Total	10,30	19			

Inat:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,10041

Error: 0,0033 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	3,40	5	0,03	A	
3	3,30	5	0,03	A	
4	3,10	5	0,03		B
2	3,00	5	0,03		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Inat:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,13013

Error: 0,0033 gl: 12

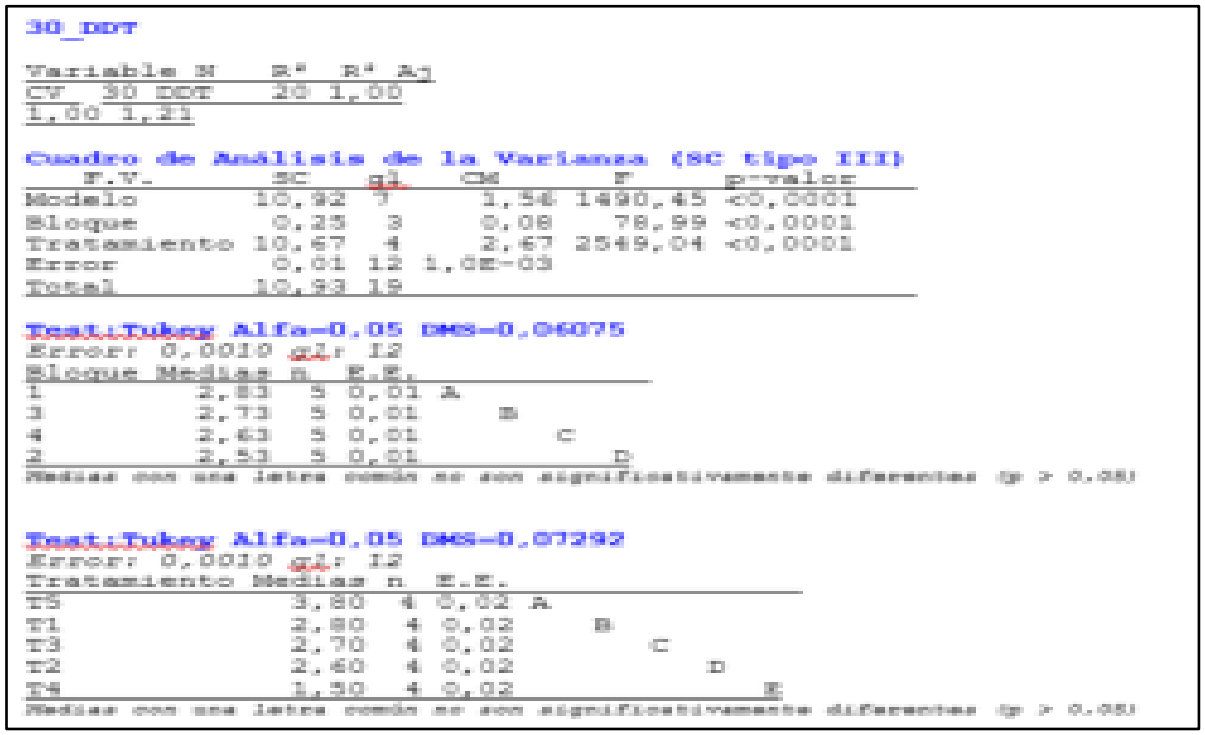
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	4,30	4	0,03	A		
T2	3,30	4	0,03		B	
T3	3,20	4	0,03		B	C
T1	3,10	4	0,03			C
T4	2,10	4	0,03			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 70.

Vigorosidad 30 días



30_DDT

Variable	N	R²	R² Aj
CV 30 DDT	20	1,00	
1,00	1,21		

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10,92	7	1,56	1490,45	<0,0001
Bloque	0,25	3	0,08	78,99	<0,0001
Tratamiento	10,67	4	2,67	2549,04	<0,0001
Error	0,01	12	1,0E-03		
Total	10,93	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,06075

Error: 0,0010 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.		
1	2,83	5	0,01	A	
3	2,73	5	0,01		B
4	2,63	5	0,01		C
2	2,53	5	0,01		D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,07292

Error: 0,0010 gl: 12

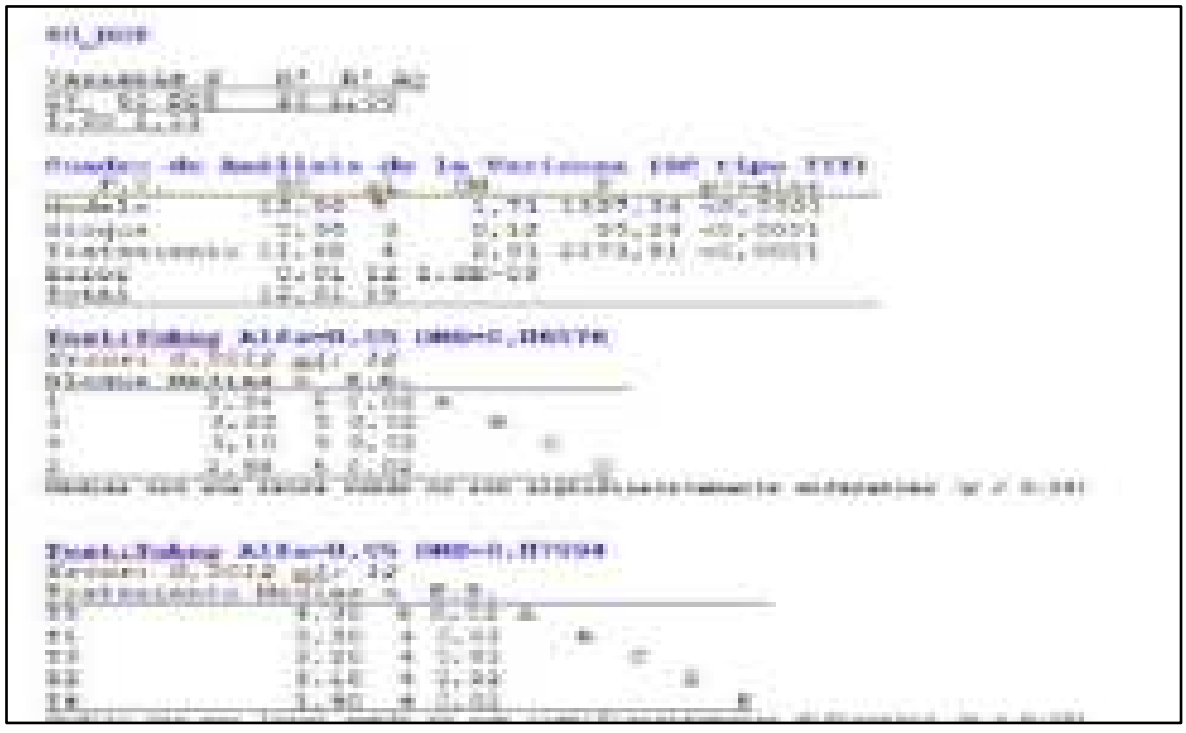
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T5	3,80	4	0,02	A		
T1	2,80	4	0,02		B	
T3	2,70	4	0,02			C
T2	2,60	4	0,02			D
T4	1,50	4	0,02			E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026

Figura 71.

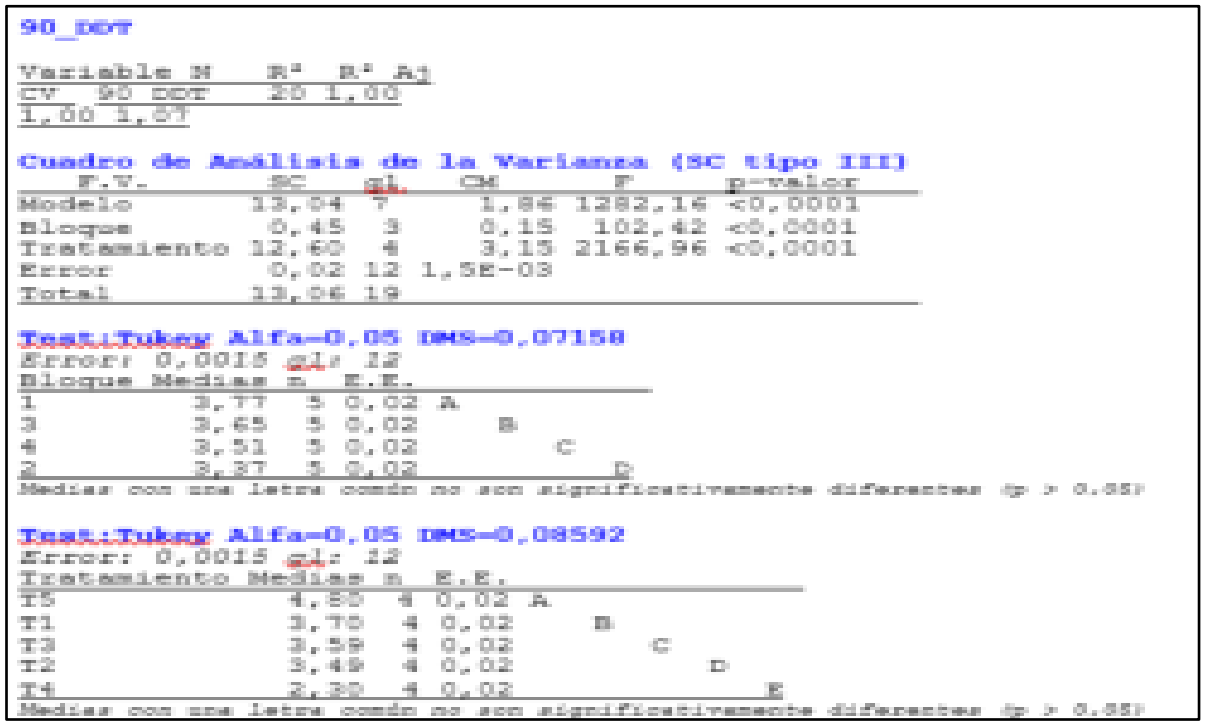
Vigorosidad 60 días



Elaborado por: La autora, 2026

Figura 72.

Vigorosidad 90 días



90_DDT

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
90 DDT	20	1,00	1,00	1,07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13,04	7	1,86	1282,16	<0,0001
Bloque	0,45	3	0,15	102,42	<0,0001
Tratamiento	12,60	4	3,15	2166,96	<0,0001
Error	0,02	12	1,5E-03		
Total	13,06	19			

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,07158

Error: 0,0015 gl: 12

Bloque	Medias	n	E.E.			
1	3,77	5	0,02	A		
3	3,65	5	0,02		B	
4	3,51	5	0,02			C
2	3,37	5	0,02			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=0,08592

Error: 0,0015 gl: 12

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
T5	4,00	4	0,02	A			
T1	3,70	4	0,02		B		
T3	3,59	4	0,02			C	
T2	3,49	4	0,02				D
T4	2,30	4	0,02				E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Elaborado por: La autora, 2026