

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI



FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

Tema: “Efecto de la interacción Citoquinina-Giberelina sobre la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola a partir de segmentos nodales”

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

AUTORES: Romero Morales Kevin Andrés

Tacán Narváez Karen Vanessa

TUTOR: Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander, MSc.

Tulcán, 2026.

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que los estudiantes Romero Morales Kevin Andrés y Tacán Narváez Karen Vanessa con el número de cédula 1004460851 y 0402079552 respectivamente han desarrollado el Trabajo de Integración Curricular: "Efecto de la interacción Citoquinina-Giberelina sobre la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola a partir de segmentos nodales"

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuesta en la Codificación del Reglamento de Régimen Académico y de Estudiantes de la UPEC, por lo tanto, autorizo la presentación de la sustentación para la calificación respectiva.

Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander, MSc.

TUTOR

Tulcán, septiembre de 2026

AUTORÍA DE TRABAJO

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

Nosotros, Romero Morales Kevin Andrés y Tacán Narváez Karen Vanessa con cédula de identidad número 1004460851 y 0402079552 respectivamente declaramos que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que hemos llegado son de nuestra absoluta responsabilidad.



Romero Morales Kevin Andrés

AUTOR



Tacán Narváez Karen Vanessa

AUTORA

Tulcán, septiembre de 2026

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Nosotros Romero Morales Kevin Andrés y Tacán Narváez Karen Vanessa declaramos ser autor de los criterios emitidos en el Trabajo de Integración Curricular: "Efecto de la interacción Citoquinina-Giberelina sobre la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola a partir de segmentos nodales" y se exime expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes de posibles reclamos o acciones legales.



Romero Morales Kevin Andrés

AUTOR



Tacán Narváez Karen Vanessa

AUTORA

Tulcán, septiembre de 2026

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis padres, Estela Morales y Byron Romero, gracias por su amor, esfuerzo, apoyo incondicional y por creer siempre en mí. Este logro también les pertenece. Asimismo, agradezco a toda mi familia por su cariño, confianza y motivación constante durante este camino.

A la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus docentes, por brindarme los conocimientos y la formación académica que contribuyeron a mi crecimiento profesional.

Finalmente, expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor del trabajo de titulación, Ing. Guillermo Jácome, MSc., por su orientación, apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Romero Morales Kevin Andrés

Expreso mi sincero agradecimiento a Dios por brindarme vida, salud y fortaleza para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional, que fueron fundamentales para mantenerme firme y culminar este proceso.

De manera especial, agradezco a mi tutor de tesis, MSc. Guillermo Jácome, por su orientación y valiosos aportes durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a mis amigos, compañeros y a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron y me acompañaron a lo largo de este proceso. A cada uno de ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud.

Tacán Narváez Karen Vanessa

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, por iluminar mi camino y darme la fortaleza para alcanzar esta importante meta.

A mi querida tía Mayra Romero, quien, aunque hoy descansa en el cielo, siempre será una fuente de inspiración para seguir luchando por mis sueños.

A mis padres, Estela Morales y Byron Romero, y a mi hermano Mateo, por su amor, apoyo incondicional, consejos y por creer siempre en mí durante cada etapa de mi vida.

A toda mi familia, tanto por parte de mi madre como de mi padre, por su cariño, apoyo y motivación constante para seguir adelante.

Finalmente, dedico este logro a las personas especiales que formaron parte de mi vida personal y universitaria, por acompañarme en los momentos buenos y difíciles, por escucharme, apoyarme y motivarme a crecer como persona. Este logro también es parte de ustedes, recordándome siempre que, con esfuerzo y perseverancia, es posible alcanzar cualquier meta.

Romero Morales Kevin Andrés

A Dios, por ser mi guía y mi fortaleza, por iluminar mi camino y darme la perseverancia necesaria para superar cada obstáculo y alcanzar esta meta.

A mis padres, Patricia Narváez y Héctor Tacán, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional, siendo mi ejemplo y fuente de mi inspiración a lo largo de este camino.

A aquellas personas que de una u otra manera, me brindaron su apoyo y palabras de aliento para continuar, incluso en los momentos más difíciles.

Hoy culmino una meta que no habría sido igual sin quienes caminaron conmigo, me apoyaron y creyeron en mí hasta el final.

Tacán Narváez Karen Vanessa

ÍNDICE

RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
I. EL PROBLEMA.....	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.3. JUSTIFICACIÓN	19
1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	21
1.4.1. Objetivo General	21
1.4.2. Objetivos Específicos.....	21
1.4.3. Preguntas de Investigación	21
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	22
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	22
2.2. MARCO TEÓRICO	26
2.2.1. Aspectos generales del cultivo de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	26
2.2.1.1. Origen e importancia socioeconómica	26
2.2.1.2. Taxonomía del cultivo	26
2.2.1.3. Variedad Superchola.....	26
2.2.1.4. Producción y certificación de la semilla de papa	27
2.2.2. Cultivo de tejidos vegetales <i>in vitro</i>	27
2.2.2.1. Fundamentos biológicos: Totipotencialidad celular.....	27
2.2.2.2. Micropropagación	27
2.2.2.3. Etapas del proceso de micropropagación	28
2.2.2.4. Selección y manejo del explante.....	29

2.2.2.5. Multiplicación de los segmentos nodales	29
2.2.3. Establecimiento de las condiciones de cultivo <i>in vitro</i>	29
2.2.3.1. Medios de cultivo: Formulación de Murashige y Skoog (MS)	29
2.2.3.2. Importancia y regulación de pH en el medio	30
2.2.3.3. Control de la contaminación: uso de PPM	30
2.2.3.4. Factores ambientales en la sala de germinación: fotoperiodo y temperatura.....	30
2.2.4. Reguladores de crecimiento y su efecto en el desarrollo <i>in vitro</i>	31
2.2.4.1. Citoquininas	32
2.2.4.2. Giberelinas	33
2.2.4.3. Interacción Citoquinina-Giberelina en el Cultivo de Papa.....	34
2.2.4.4. Vigor de las plantas <i>in vitro</i>	35
2.2.5. Alteraciones fisiológicas asociadas a la micropropagación.....	36
2.2.5.1. Vitricación.....	36
2.2.5.2. Formación de callo	37
III. METODOLOGÍA	39
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	39
3.1.1. Enfoque	39
3.1.2. Tipo de Investigación	39
3.2. HIPÓTESIS	40
3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	40
3.3.1. Definición de variables	40
3.3.2. Operacionalización de variables	41
3.4. MÉTODOS UTILIZADOS	42
3.4.1. Área de estudio	42
3.4.2. Tratamientos del diseño experimental.....	43
3.4.3. Características y distribución del diseño experimental	43
3.4.4. Procedimientos	45

3.4.4.1. Obtención y selección del material vegetal	45
3.4.4.2. Preparación del medio de cultivo	46
3.4.4.3. Esterilización de materiales y medios	46
3.4.4.4. Siembra de los explantes.....	46
3.4.4.5. Distribución de los tratamientos.....	47
3.4.4.6. Condiciones de crecimiento <i>in vitro</i>	47
3.4.4.7. Monitoreo y evaluación de las vitroplantas.....	47
3.4.4.8. Variables evaluadas	47
3.4.4.9. Número de brotes	47
3.4.4.10. Número de nudos.....	48
3.4.4.11. Longitud de vitroplantas (cm)	48
3.4.4.12. Diámetro de tallo (mm)	48
3.4.4.13. Biomasa fresca (g)	48
3.4.4.14. Biomasa seca (g).....	48
3.4.4.15. Porcentaje de materia seca (%)	49
3.4.4.16. Índice de vigor morfológico (IVM)	49
3.4.4.17. Incidencia de hiperhidricidad (%)	50
3.4.4.18. Formación de callo (Callogénesis) (%)	50
3.4.4.19. Índice de calidad.....	50
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1. RESULTADOS	52
4.1.1. Variable de Brotes.....	52
4.1.2. Variable de Nudos	54
4.1.3. Variable de Longitud	56
4.1.4. Variables de diámetro de tallo.....	58
4.1.5. Variables de Biomasa (Fresca, Seca y Porcentaje de Materia Seca)	59
4.1.6. Variable de índice de calidad	61

4.1.7. Índice de Vigor Morfológico (IVM)	62
4.1.8. Incidencia de Hiperhidricidad	64
4.1.9. Incidencia de Callogénesis.....	65
4.1.10. Análisis costo - beneficio	67
4.2. DISCUSIÓN	69
4.2.1. Discusión de la variable número de brotes.....	69
4.2.2. Discusión de la variable número de nudos	70
4.2.3. Discusión de la variable longitud de la vitroplanta	71
4.2.4. Discusión de la variable diámetro de tallo.....	71
4.2.5. Discusión de las variables biomasa fresca, biomasa seca y porcentaje de materia seca.....	72
4.2.6. Discusión de la variable índice de calidad.....	72
4.2.7. Discusión del Índice de Vigor Morfológico (IVM)	73
4.2.8. Discusión de la incidencia de hiperhidricidad	73
4.2.9. Discusión de la incidencia de callogénesis	74
4.2.10. Discusión de rentabilidad	75
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
5.1. CONCLUSIONES	77
5.2. RECOMENDACIONES	78
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
VII. ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía del cultivo de papa	26
Tabla 2. Operacionalización de variables	41
Tabla 3. Tratamientos del experimento	43
Tabla 4. Características del experimento	44
Tabla 5. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el número de brotes en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. evaluadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo	53
Tabla 6. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el número de nudos en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. evaluadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo.	55
Tabla 7. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre la longitud en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. evaluadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo.	57
Tabla 8. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el diámetro de tallo en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. evaluadas a los 28 días de cultivo.	58
Tabla 9. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre la biomasa fresca, biomasa seca y porcentaje de materia seca en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. evaluadas a los 28 días de cultivo.	60
Tabla 10. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el índice de calidad en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. evaluadas a los 28 días de cultivo.	61
Tabla 11. Efecto de los tratamientos sobre el Índice de Vigor Morfológico en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. a los 28 días de cultivo.	62
Tabla 12. Frecuencia y porcentaje de hiperhidricidad en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. bajo diferentes tratamientos a los 28 días.	64
Tabla 13. Frecuencia y porcentaje de callogénesis en vitroplantas de <i>Solanum tuberosum</i> L. bajo diferentes medios de cultivo a los 28 días.	66
Tabla 14. Análisis costo-beneficio de los tratamientos evaluados para la producción de plantas in vitro de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Superchola.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de propagación <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L., mediante segmentos nodales y regeneración de brotes	33
Figura 2. Plantas <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> var. Cecilia durante la etapa de multiplicación en medio MS con GA ₃	34
Figura 3. Escala de evaluación del Índice de Vigor Morfológico (IVM) de las plantas <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L.	36
Figura 4. Hiperhidricidad (vitricificación) en una planta <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L.	37
Figura 5. Formación de callo en un explante <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L.	38
Figura 6. Ubicación del experimento.....	42
Figura 7. Distribución y croquis del experimento en el Laboratorio (UPEC) de Biotecnología Vegetal	45
Figura 8. Distribución porcentual del Índice de Vigor Morfológico (IVM) por tratamiento a los 28 días	63
Figura 9. Proporción de hiperhidricidad por tratamiento a los 28 días de cultivo	64
Figura 10. Proporción de callogénesis por tratamiento a los 28 días de cultivo	66
Figura 11. INIAP Santa Catalina.....	87

Figura 12. Material vegetal <i>in vitro</i>	87
Figura 13. Lab. de Biotecnología vegetal	87
Figura 14. Preparación del medio de cultivo	87
Figura 15. Esterilización de medios y materiales	88
Figura 16. Preparación explantes.....	88
Figura 17. Siembra de explantes	88
Figura 18. Área de crecimiento <i>in vitro</i>	88
Figura 19. Evaluación de brotes y nudos.....	89
Figura 20. Medición de longitud.....	89
Figura 21. Medición diámetro de tallo	89
Figura 22. Determinación de biomasa	89
Figura 23. Secado de muestras	90
Figura 24. Desarrollo de vitroplantas	90
Figura 25. Índice de vigor e hiperhidricidad	90
Figura 26. Formación de callo	90

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas	84
Anexo 2. Acta de entrega-recepción de las plantas <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Superchola	86
Anexo 3. Procedimiento experimental	87
Anexo 4. Script para realizar el análisis estadístico en R Studio	91

RESUMEN

La agricultura moderna enfrenta desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad, la productividad y la adaptación a condiciones ambientales cambiantes. En este contexto, el uso de alternativas biotecnológicas ha emergido como una estrategia prometedora para mejorar el crecimiento y rendimiento de los cultivos de manera sostenible. Esta investigación tuvo como objetivos analizar la influencia de la interacción de reguladores de crecimiento en el desarrollo morfogénico del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Superchola, determinar su impacto en el desarrollo vegetativo y definir cuál de los tratamientos presenta mayor rentabilidad. Se evaluaron diferentes combinaciones de 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido giberélico (GA3), aplicadas a partir de segmentos nodales bajo condiciones controladas de laboratorio. Los resultados mostraron que el tratamiento T8 (2,0 mg/L de BAP + 0,1 mg/L de GA3) obtuvo los mejores resultados en términos de vigor morfológico y estabilidad fisiológica, con un 81,25% de vitroplantas catalogadas como vigorosas y ausencia de hiperhidricidad. Además, este tratamiento presentó la mayor rentabilidad económica, con una relación costo-beneficio de 1,33 USD por cada dólar invertido. Estos hallazgos indican que la interacción equilibrada de fitohormonas mejora significativamente la eficiencia de la micropropagación *in vitro*, reduciendo alteraciones fisiológicas indeseadas. La investigación contribuye al fortalecimiento de los programas de producción de semilla prebásica, ofreciendo alternativas biotecnológicas para solucionar la problemática de la degeneración de semilla en la región.

Palabras Claves: *Solanum tuberosum*, Micropropagación, Reguladores de crecimiento, Vigor morfológico, Análisis costo-beneficio.

ABSTRACT

Modern agriculture faces significant challenges regarding sustainability, productivity, and adaptation to changing environmental conditions. In this context, the use of biotechnological alternatives has emerged as a promising strategy to enhance crop growth and yield sustainably. This research aimed to analyze the influence of the interaction of growth regulators on the morphogenic development of the potato (*Solanum tuberosum* L.) variety Superchola, determine its impact on vegetative development, and identify which treatment offers the highest profitability. Different combinations of 6-benzylaminopurine (BAP) and gibberellic acid (GA3), applied to nodal segments under controlled laboratory conditions, were evaluated. The results demonstrated that treatment T8 (2.0 mg/L BAP + 0.1 mg/L GA3) achieved the best outcomes in terms of morphological vigor and physiological stability, with 81.25% of in vitro plants categorized as vigorous and an absence of hyperhydricity. Furthermore, this treatment presented the highest economic profitability, with a cost-benefit ratio of 1.33 USD for every dollar invested. These findings indicate that a balanced interaction of phytohormones significantly improves the efficiency of in vitro micropropagation while reducing undesirable physiological alterations. This research contributes to strengthening pre-basic seed production programs by offering biotechnological alternatives to address the problem of seed degeneration in the region.

Keywords: *Solanum tuberosum*, Micropropagation, Growth regulators, Morphological vigor, Cost-benefit analysis.

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es uno de los cultivos alimentarios más importantes a nivel mundial debido a su aporte nutricional, adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas y relevancia en la seguridad alimentaria. En Ecuador, este cultivo forma parte de la dieta básica de las comunidades andinas y representa una alternativa estratégica para el desarrollo productivo y económico del sector agrícola (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024).

Sin embargo, en la provincia del Carchi, este sistema productivo enfrenta limitaciones críticas provocadas por la escasez y el elevado costo de la semilla certificada. Esta situación obliga a los agricultores a utilizar tubérculos de cosechas anteriores de forma recurrente. Esta práctica no solo incrementa la carga y dispersión de patógenos sistémicos, sino también provoca la degeneración fisiológica del material de siembra, reduciendo drásticamente el rendimiento y la calidad comercial del cultivo.

Frente a esta problemática, el cultivo de tejidos vegetales representa una alternativa biotecnológica eficiente para la obtención de material vegetal libre de patógenos y genéticamente uniforme. La micropropagación *in vitro* permite la multiplicación rápida y masiva de plantas bajo condiciones controladas y permite superar las limitaciones asociadas a la propagación convencional. Sin embargo, el éxito de esta técnica depende de la composición del medio de cultivo y de la precisión con la que se apliquen los reguladores de crecimiento, sumado a un control estricto de factores ambientales como la temperatura, humedad y la luz para una micropropagación exitosa.

Dentro de los reguladores de crecimiento se encuentran las citoquininas, las cuales desempeñan un rol muy importante al realizar la división celular y la ruptura de la dominancia apical, favoreciendo la elongación de yemas axilares para la formación de brotes laterales. Asimismo, participan en procesos fisiológicos relacionados con el equilibrio hormonal y la respuesta al estrés, contribuyendo al crecimiento y desarrollo vegetal. Por otro lado, las giberelinas (GA_3) intervienen en la elongación celular, germinación y crecimiento del tallo, actuando de manera complementaria con las

citoquininas (BAP) durante el desarrollo de los explantes *in vitro* (El Hadrami, 2024; Sharma *et al.*, 2022).

Los segmentos nodales, al contener meristemos axilares con elevada capacidad regenerativa, representan los explantes más adecuados para la propagación de especies como la papa, asegurando uniformidad clonal y estabilidad genética. Sin embargo, la eficiencia de la micropropagación *in vitro* depende de protocolos específicos adaptados al cultivo, dado que la respuesta morfogénica varía según la genética, el tipo de explante y las concentraciones de reguladores de crecimiento utilizados.

Esta investigación busca evaluar el efecto de la interacción entre BAP y GA₃ en la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola, utilizando segmentos nodales como explantes. Los resultados no solo contribuirán a la producción de semilla certificada, sino que también fortalecerán la capacidad del Centro Experimental San Francisco para transferir tecnología a los agricultores locales, promoviendo la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria en la región.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, la papa (*Solanum tuberosum* L.) constituye uno de los cultivos alimentarios más importantes, y su cadena de propagación tradicional enfrenta pérdidas de rendimiento considerables debido a la acumulación progresiva de patógenos virales en la semilla utilizada de manera sucesiva por los agricultores. Este fenómeno, conocido como degeneración de semilla, representa un desafío productivo y económico compartido por los principales países productores de papa, ya que compromete la sanidad del material de siembra y limita la sostenibilidad de los sistemas de producción a largo plazo.

En Ecuador, la papa se ubica entre los cultivos de mayor producción nacional, con más de 19 000 hectáreas sembradas; sin embargo, apenas el 5 % de la semilla utilizada por los pequeños agricultores se encuentra formalmente certificada. Esta baja cobertura de semilla de calidad mantiene estancado el rendimiento promedio nacional en alrededor de 14 toneladas por hectárea, un nivel considerablemente inferior al estándar internacional, lo que evidencia la magnitud del problema a nivel meso y la necesidad de fortalecer alternativas biotecnológicas de propagación que reduzcan la dependencia de semilla degenerada.

La producción de papa a nivel nacional se encuentra severamente limitada por la escasez de semilla certificada, lo que obliga a los agricultores a reutilizar tubérculos de cosechas anteriores o adquirir material de propagación de calidad incierta. Esta práctica repetitiva propicia la degeneración de semilla, un fenómeno patológico y fisiológico provocado por la acumulación progresiva de carga viral y plagas en los tubérculos (Velásquez *et al.*, 2021).

Según reportes del International Potato Center (2023), aproximadamente la mitad de los agricultores ecuatorianos han experimentado este deterioro que se manifiesta en plantas débiles, alteraciones morfológicas en los tubérculos y una caída drástica en los rendimientos, una situación condicionada por brechas socioeconómicas y la

limitada disponibilidad de canales de suministro de semilla de calidad en las zonas productoras del país.

La papa constituye uno de los cultivos de mayor importancia económica y alimentaria en el Ecuador, especialmente en la región Sierra, donde representa una fuente fundamental de ingresos para miles de pequeños y medianos productores. En provincias como Carchi, donde la actividad papera tiene una alta relevancia productiva, la disminución de la calidad de la semilla repercute directamente en la productividad de los cultivos, incrementa los costos de producción y reduce la rentabilidad de los agricultores. Diversos estudios han demostrado que la baja calidad fitosanitaria de la semilla está asociada con pérdidas de rendimiento ocasionadas por virus, enfermedades y plagas presentes en los tubérculos-semilla (Navarrete *et al.*, 2017).

Frente a esta problemática, la biotecnología vegetal ofrece alternativas para la obtención de material de siembra con altos estándares fitosanitarios. Entre estas, la micropropagación *in vitro* se ha consolidado como una herramienta eficiente para la producción masiva de plantas libres de patógenos, permitiendo acelerar los programas de multiplicación de semilla y contribuir al abastecimiento de material vegetal de calidad. Esta técnica facilita la obtención de plantas uniformes y sanas, fundamentales para los sistemas modernos de producción de semilla prebásica y básica (Mohamed y Girgis, 2023).

En protocolos de micropropagación, los reguladores de crecimiento juegan papeles decisivos en el desarrollo de plantas libres de enfermedades y cada hormona cumple funciones diferentes. Sin embargo, la respuesta a estos reguladores puede variar dependiendo de la especie, el tipo de explante, concentraciones y combinaciones de fitohormonas exógenas, lo que obliga a una optimización específica para cada variedad (Zhang *et al.*, 2023). Esta variabilidad dificulta la estandarización de protocolos hormonales y limita la obtención de material vegetal uniforme y de alta calidad fitosanitaria en condiciones *in vitro*.

A pesar de los avances en la propagación *in vitro* de papa, todavía existe información limitada sobre las concentraciones y combinaciones hormonales más adecuadas para optimizar el crecimiento y la multiplicación de determinadas variedades cultivadas en el Ecuador. Diferentes investigaciones han señalado que la respuesta morfogénica de los explantes depende significativamente del genotipo y

de la interacción entre reguladores de crecimiento, por lo que los protocolos desarrollados para una variedad no siempre pueden extrapolarse a otras (Nagy et al., 2023; Mohamed y Girgis, 2023).

En este contexto, resulta necesario evaluar el efecto de diferentes reguladores de crecimiento sobre el desarrollo *in vitro* de la papa, con el fin de identificar tratamientos que favorezcan una mayor tasa de multiplicación, crecimiento y calidad de las plantas obtenidas. Los resultados de esta investigación contribuirán al fortalecimiento de los programas de producción de semilla de calidad, proporcionando bases científicas para mejorar los procesos de micropropagación y aportar soluciones a la problemática de la degeneración de semilla que afecta al cultivo de papa en la provincia del Carchi y en otras zonas productoras del Ecuador.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué manera influye la interacción Citoquinina-Giberelina sobre la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola a partir de segmentos nodales en el Laboratorio de Biotecnología Vegetal de la UPEC, Tulcán, durante el período 2026?

1.3. JUSTIFICACIÓN

La optimización de un protocolo de micropropagación *in vitro* para *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola responde a la urgente necesidad de mitigar la escasez de semilla certificada en Ecuador, un factor crítico que afecta significativamente la productividad agrícola y la seguridad alimentaria nacional. Este tubérculo constituye un pilar socioeconómico para miles de familias productoras y se consagra históricamente como uno de los cultivos de mayor importancia en la dieta de la población ecuatoriana (Andrade-Piedra et al., 2022). Por lo tanto, generar alternativas biotecnológicas que garanticen la disponibilidad de material inicial sano y de alta calidad es fundamental para el desarrollo sostenible del sector agrícola.

Desde el punto de vista social, esta investigación contribuye directamente con los productores paperos de la provincia del Carchi, una de las principales zonas productoras del país, quienes enfrentan severas pérdidas económicas debido al uso de semilla degenerada por patógenos. Estudios recientes en los Andes ecuatorianos demuestran que las prácticas de reutilización de semilla y las condiciones agroecológicas perpetúan la degeneración, impactando directamente la economía de los agricultores (Navarrete et al., 2022); además, se ha documentado

que el sinergismo de virus en semillas degeneradas puede ocasionar pérdidas de hasta un 80 % en el rendimiento del tubérculo (Tessema *et al.*, 2023). La introducción de material vegetal libre de enfermedades optimizará el rendimiento de los cultivos locales, mitigando el impacto de las fitopatologías y promoviendo mejores condiciones de vida para las familias que dependen de esta actividad económica.

La micropropagación *in vitro* supera las limitaciones de los métodos tradicionales de propagación asexual al asegurar una alta calidad sanitaria y una rigurosa fidelidad genética de forma masiva y continua durante todo el año. En este estudio, el uso de segmentos nodales es clave, ya que sus meristemas axilares minimizan la variación somaclonal (Majumder *et al.*, 2025), favoreciendo la producción eficiente y estandarizada de semilla prebásica en espacios reducidos y bajo condiciones controladas.

El valor científico de la investigación radica en explorar la interacción específica entre el BAP y el GA₃ en la variedad Superchola, un cultivar escasamente documentado en la literatura biotecnológica. Si bien existen protocolos para otras variedades de *Solanum tuberosum*, la respuesta regenerativa está ligada estrechamente a la carga genética y a los niveles de hormonas endógenas de cada explante. Esto impide una transferencia lineal de metodologías y exige el ajuste preciso de las dosis hormonales para este genotipo en particular.

La utilidad metodológica se refleja en la validación de los segmentos nodales y en el establecimiento de un diseño experimental factorial 3×3. Este enfoque estadístico permitirá identificar interacciones significativas, aportando evidencia cuantitativa sobre el efecto individual y combinado de ambos reguladores de crecimiento, sirviendo además como marco de referencia para futuras investigaciones relacionadas con la propagación *in vitro* de otras variedades o especies de interés agrícola.

Desde la perspectiva económica, el estudio evalúa la relación entre los costos de laboratorio y la eficiencia biológica de los tratamientos mediante un análisis costo-beneficio. Esta información proveerá a las instituciones de investigación y productores interesados de una base real para la toma de decisiones sobre la viabilidad técnica y financiera del escalamiento del protocolo.

Finalmente, esta investigación integra las demandas del sector productivo del Carchi con la generación de conocimiento teórico y práctico. Al optimizar las técnicas de

micropropagación de la papa Superchola, se fortalece la cadena de multiplicación de semilla de calidad, el fortalecimiento de los programas de mejoramiento vegetal y se incrementa la competitividad del sector papero ecuatoriano frente a los desafíos fitosanitarios y económicos actuales.

1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la interacción Citoquinina-Giberelina sobre la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola a partir de segmentos nodales.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar la combinación óptima de (BAP) y (GA_3) que maximice la tasa de multiplicación de brotes en *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola a partir de segmentos nodales.
- Analizar la calidad morfofisiológica de las plantas *in vitro* bajo diferentes combinaciones de BAP y GA_3 .
- Estimar la rentabilidad económica mediante un análisis costo/beneficio de los tratamientos utilizados en el cultivo de *Solanum tuberosum* L.

1.4.3. Preguntas de Investigación

- ¿De qué manera influyen las concentraciones de BAP y GA_3 en el establecimiento morfogénico inicial de segmentos nodales de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola bajo condiciones *in vitro*?
- ¿Cómo afectan las diferentes combinaciones de BAP y GA_3 en la calidad morfofisiológica de las plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola obtenidas mediante cultivo *in vitro*?
- ¿Qué tratamiento aplicado en el cultivo de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola presenta mayor rentabilidad económica según el análisis costo/beneficio?

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Como fundamento teórico del presente estudio, se consideró pertinente revisar investigaciones previas relacionadas con la temática abordada. En este sentido, a continuación, se presentan los principales antecedentes que sustentan la investigación:

Sangacha (2026), en su investigación desarrollada en la Universidad Estatal de Bolívar, titulada “*Evaluación de explantes de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad INIAP-Natividad mediante propagación in vitro utilizando dos citoquininas en diferentes dosis*”, evaluó el efecto de la Kinetina y 6-Bencilaminopurina (BAP), en dosis de 0, 2, 4 y 6 mg/l mediante un Diseño Completamente al Azar con arreglo factorial 2x4. Entre las variables analizadas se consideraron contaminación, número de brotes, altura de brotes, velocidad de multiplicación, proliferación y viabilidad de vitroplantas. Los resultados demostraron que la aplicación de citoquininas influyó significativamente en la respuesta morfogénica de los explantes, destacándose la BAP a 2 mg/l como el tratamiento más eficiente para estimular la multiplicación y desarrollo vegetativo. Asimismo, la kinetina presentó mayores porcentajes de viabilidad en las vitroplantas. El estudio concluyó que el uso adecuado de reguladores de crecimiento favorece la obtención de material vegetal sano y de alta calidad para programas de micropropagación de papa.

Por el contrario, Stupko y Lugovtsova (2023), en su artículo científico titulado “*Uso de fitohormonas para incrementar la eficiencia de la propagación de papa mediante cultivo de cortes nodales*”, evaluaron el efecto de diferentes reguladores de crecimiento, entre ellos ácido giberélico (GA_3), auxinas (ANA, AIA, IBA) y citoquininas (BAP), sobre el crecimiento y formación de entrenudos en las vitro plantas de papa. El estudio se basó en un análisis comparativo de investigaciones relacionadas con la

propagación de papa mediante cortes nodales, considerando variables como longitud de brotes, número de entrenudos y tasa de crecimiento. Los resultados evidenciaron que combinaciones de 0,2 mg/l de GA₃ con 0,01 mg/l de ANA incrementaron significativamente la longitud de brotes y el número de entrenudos, alcanzando aumentos hasta de un 73 % en comparación con el medio sin reguladores de crecimiento. Asimismo, tratamientos con relaciones de 2:1 y 3:1 entre GA₃ y auxinas mostraron mayor eficiencia en el desarrollo vegetativo de las microplantas. Por otra parte, el uso de BAP presentó efectos menos favorables, debido a que redujo la longitud de tallos y el número de entrenudos en comparación con tratamientos que contenían únicamente giberelinas y auxinas. Finalmente, la investigación concluyó que la combinación de ácido giberélico y auxinas mejora significativamente la eficiencia de la propagación *in vitro* de papa, mientras que el uso de citoquininas no resulta relevante durante las etapas de multiplicación.

En concordancia con estos hallazgos, Silva-Agurto *et al.* (2024), en su artículo científico titulado "Efecto de diferentes fitohormonas en la multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia", aplicó un diseño experimental completamente al azar, en donde se evaluaron auxinas como ANA, AIB y AIA; citoquininas como 6-BAP, TDZ y Zeatina; y giberelina AG3 en diferentes concentraciones. Las variables evaluadas fueron número de nudos, número de hojas, número de brotes y altura de planta durante la etapa de multiplicación *in vitro*. Los resultados demostraron que el AIB en concentraciones de 0,05 y 0,25 mg/L incrementó el número de nudos y hojas. En el caso de las citoquininas, la Zeatina en concentraciones de 0,05 y 0,10 mg/L presentó los mejores resultados al aumentar significativamente el número de hojas, brotes y altura de planta, mientras que concentraciones altas redujeron el desarrollo vegetativo. Por otra parte, la giberelina AG3 a 0,15 mg/L favoreció el incremento del número de nudos en las vitroplantas. La investigación concluyó que el equilibrio hormonal constituye un factor determinante para optimizar la multiplicación *in vitro* y obtener material vegetal con mejores características morfofisiológicas y fitosanitarias.

De manera similar, Ventocilla-Sanchez (2024), en su investigación titulada "Efecto de los reguladores de crecimiento en la multiplicación *in vitro* de papa (*Solanum tuberosum*) var. Bicentenaria", evaluó la influencia de auxinas, citoquininas y giberelinas sobre el desarrollo vegetativo de la vitroplantas de papa durante Durante las fases de inicio y multiplicación *in vitro*. El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente aleatorizado con 10 repeticiones por tratamiento, utilizando ácido

indolbutírico (IBA), ácido indolacético (AIA), ácido giberélico (AG3), bencilaminopurina (BAP) y kinetina (KIN) en concentraciones de 0,5; 1 y 1,5 ppm. Las variables analizadas fueron cantidad de hojas, altura de planta, número de raíces, longitud de raíz y número de brotes. Los resultados demostraron que el tratamiento T9 con 1,5 ppm de AG3 presentó la mayor cantidad de hojas, mientras que los tratamientos T8 con 1 ppm de AG3 y T7 con 0,5 ppm de AG3 obtuvieron mayor altura de planta. En la variable número de raíces, los tratamientos T5 con 1 ppm de AIA, T8 con 1 ppm de AG3 y T6 con 1,5 ppm de AIA registraron los mejores resultados. La investigación concluyó que la aplicación de reguladores de crecimiento influye significativamente en la multiplicación *in vitro* de papa variedad Bicentenaria, siendo los tratamientos con AG3 y AIA los más eficientes para estimular el desarrollo vegetativo y la obtención de vitroplantas vigorosas.

En concordancia con estos hallazgos, Shah *et al.* (2021) investigaron el efecto de diferentes dosis de ácido giberélico (GA₃) y kinetina sobre la multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. bajo un diseño experimental con arreglo factorial, evaluando variables de elongación de brotes, número de nudos y porcentaje de hiperhidricidad. Los resultados demostraron que las tasas de elongación y formación de nudos dependen estrechamente de no sobrepasar el umbral crítico de hiperhidricidad, encontrando que las dosis bajas y moderadas de GA₃ combinadas con kinetina favorecieron un desarrollo vegetativo vigoroso, mientras que concentraciones elevadas indujeron vitrificación y reducción del crecimiento. Los autores concluyeron que el equilibrio hormonal preciso entre citoquininas y giberelinas resulta determinante para maximizar la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de papa sin comprometer la calidad morfofisiológica de las vitroplantas.

Ali *et al.* (2022) realizó la investigación titulada “*Establecimiento in vitro de papa (Solanum tuberosum) variedad Purén a partir de meristemos*”. El estudio se desarrolló bajo un Diseño Completamente al Azar que consistió en seis tratamientos: ascórbico (3 mg/L); GA₃ (2 mg/L); BAP (0,5 mg/L), cinetina (0,5 mg/L) y MS sin fitohormonas suplementado con 20 g/L de sacarosa y pH 5,6. Las variables evaluadas fueron la formación de callo, el número de nudos y la altura de las plántulas *in vitro*. El medio MS proporcionó el mayor desarrollo vegetativo con 8,17 nudos y 8 cm, mientras que las combinaciones con GA₃, BAP y cinetina solo estimularon entre 60 y 100% de la callogénesis. La investigación concluyó que el mejor medio para el establecimiento *in vitro* de meristemos de papa variedad Purén fue el medio MS sin fitohormonas

suplementado con 20 g/L de sacarosa y pH 5,6, debido a que favoreció mayor número de nudos y mejor elongación de las vitroplántulas, permitiendo un adecuado desarrollo del material vegetal bajo condiciones *in vitro*.

Hajare, Chauhan y Kassa (2021), en su investigación titulada "Efecto de los reguladores del crecimiento en la micropropagación *in vitro* de las variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) Gudiene y Belete de Etiopía", evaluaron el efecto de diferentes reguladores de crecimiento en la micropropagación *in vitro* de papa a partir de yemas laterales cultivadas en medio Murashige y skoog (MS) bajo un diseño completamente al azar, utilizando tres repeticiones por tratamiento. En donde se evaluaron diferentes concentraciones de citoquininas (BAP, 0,5;1,5 y 2,0 mg/L) en combinación con ácido naftalenacético (NAA, 0;1;2;3 y 4 mg/L) para inducción y multiplicación de brotes. Los resultados demostraron que la combinación de 1,5 mg/L de BAP + 3mg/L de NAA produjo la mejor inducción de brotes en la variedad Gudiene, mientras que 1mg/L de BAP +2 mg/L de NAA favoreció mayor formación de brotes en la variedad Belete. En la fase de multiplicación, las mayores tasas de proliferación se obtuvieron con 2,5 mg/L de kinetina, alcanzando hasta 8,35 brotes por explante. Los autores concluyeron que la respuesta morfogénica y la eficiencia de la micropropagación dependen de la concentración y combinación de reguladores de crecimiento utilizados, así como del genotipo de la variedad de papa evaluada.

Pineda-Lazaro *et al.* (2021), en su investigación titulada "Multiplicación y reducción del crecimiento *in vitro* de papa chaucha (*Solanum tuberosum* L. grupo *Phureja*)", evaluaron el efecto de diferentes concentraciones de bencilaminopurina (BAP), ácido giberélico (AG3) sobre la multiplicación y conservación de explantes *in vitro* de segmentos nodales de papa chaucha cultivados en medio Murashige y Skoog. El estudio utilizó concentraciones de 0,5 y 1mg/l de BAP y GA₃ bajo un diseño completamente al azar con 5 tratamientos y 15 repeticiones, en donde se analizaron variables como altura de planta, número de nudos y crecimiento de los explantes durante las fases de multiplicación y conservación *in vitro*. Los resultados evidenciaron que las dosis evaluadas no generaron diferencias significativas respecto al medio MS sin reguladores de crecimiento; sin embargo, todos los tratamientos promovieron adecuado desarrollo vegetativo y formación de raíces, por lo tanto, los autores concluyeron que la respuesta morfogénica depende del genotipo y de la

concentración hormonal utilizada destacando la necesidad de optimizar las dosis de BAP y GA₃ para mejorar la eficiencia de la multiplicación *in vitro* de la papa.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Aspectos generales del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.)

2.2.1.1. Origen e importancia socioeconómica

La papa (*Solanum tuberosum* L.) tuvo su origen en la región andina de América del Sur e inicio su proceso de domesticación hace aproximadamente 8000 años cerca del lago Titicaca, luego este cultivo se expandió globalmente hasta convertirse en uno de los principales alimentos para la población mundial, debido a su valor nutricional, capacidad de adaptación y contribución a la seguridad alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024).

En el Carchi, la papa es un cultivo de gran importancia socioeconómica, donde pequeños y medianos productores dependen de su cultivo para la subsistencia y el comercio. No obstante, los agricultores optan por el uso de semilla de baja calidad, lo que limita su productividad y conduce a la disminución progresiva del rendimiento del cultivo (Navarrete *et al.*, 2022).

2.2.1.2. Taxonomía del cultivo

La clasificación taxonómica permite identificar de manera precisa las relaciones botánicas existentes entre las distintas especies y subespecies cultivadas, como se presenta a continuación:

Tabla 1. Taxonomía del cultivo de papa	
Categoría	Nombre
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta (Angiospermas)
Clase	Magnoliopsida (Dicotiledóneas)
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	Solanum
Especie	<i>Solanum tuberosum</i> L.
Subespecie	<i>Solanum tuberosum</i> L. subsp. <i>andigena</i>
Cultivar	Superchola

Fuente: Adaptado de USDA (2023)

2.2.1.3. Variedad Superchola

La papa variedad Superchola es una de las más representativas y cultivadas en la región Sierra del Ecuador, especialmente en la zona norte donde fue desarrollada

por el Sr. Germán Bastidas. Esta variedad se caracteriza por presentar crecimiento semierecto, tallos verdes con pigmentación púrpura, hojas de color verde intenso y floración moderada sobre el follaje, posee un periodo vegetativo aproximado de 180 días y una dormancia cercana a 80 días (INIAP, 2026).

2.2.1.4. Producción y certificación de la semilla de papa

La calidad de la semilla de papa constituye uno de los factores más determinantes en el rendimiento y el éxito del cultivo, por lo que realizar una correcta selección es crucial. Los sistemas formales de certificación de semilla se enfocan en la producción de categorías prebásicas en ambientes controlados para garantizar la ausencia de patógenos sistémicos, optimizando la dinámica de absorción de nutrientes en variedades de alto interés como la Superchola, lo que asegura que las siguientes multiplicaciones en campo mantengan el vigor híbrido y los estándares de sanidad requeridos por las normativas agrícolas (Arteaga-Chamorro *et al.*, 2022).

2.2.2. Cultivo de tejidos vegetales *in vitro*

El cultivo *in vitro* es una técnica biotecnológica que permite el crecimiento y desarrollo de células, tejidos u órganos vegetales bajo condiciones asépticas y controladas en un laboratorio, en donde se utilizan medios de cultivo artificiales u hormonas para la reproducción de nuevas plantas (Kulus & Tymoszuk, 2024).

En el caso de la papa, las técnicas del cultivo *in vitro* se han consolidado como una herramienta fundamental para optimizar la producción. Este método permite obtener plantas libres de patógenos mediante técnicas como el cultivo de meristemas, lo cual asegura la producción de material vegetal de alta calidad genética y fitosanitaria (Hajare *et al.*, 2021).

2.2.2.1. Fundamentos biológicos: Totipotencialidad celular

La totipotencialidad vegetal es la capacidad que tiene una célula vegetal para multiplicarse y formar un organismo completo. Este fenómeno se consolida como la base para el cultivo de tejidos vegetales y la micropropagación *in vitro*, ya que permite que las células somáticas se reprogramen y desarrollen nuevos órganos mediante procesos de división celular (Malabadi *et al.*, 2025)

2.2.2.2. Micropropagación

La micropropagación es una técnica de propagación clonal basada el cultivo *in vitro*, que permite la multiplicación masiva de plantas a partir de pequeños

fragmentos de tejido vegetal en un corto periodo de tiempo y mediante procedimientos estrictos que evitan contaminaciones cruzadas (Kulus & Tymoszek, 2024).

Para Jácome Sarchi *et al.* (2025), la micropropagación *in vitro* representa una alternativa eficiente a los métodos convencionales de propagación, debido a que permite la rápida multiplicación de las plantas sanas mediante el uso de meristemos, segmentos nodales y otras estructuras vegetativas bajo condiciones controladas. Sin embargo, su implementación requiere de infraestructura especializada, control de calidad y personal especializado para evitar problemas como la variación somaclonal o contaminación microbiana.

La micropropagación en el cultivo de papa constituye una técnica fundamental para la producción de semilla pre-básica, ya que permite obtener plantas con alta uniformidad genética y libre de patógenos que suelen acumularse en la semilla tradición. Este método facilita la conservación de germoplasma y permite mantener variedades nativas-mejoradas en espacios reducidos y con menor riesgo de pérdida genética (Malabadi *et al.*, 2025).

2.2.2.3. Etapas del proceso de micropropagación

Para Aryal (2022), el éxito de un protocolo de micropropagación requiere el cumplimiento riguroso de una serie de etapas cronológicas que deben ejecutarse bajo condiciones estrictamente asépticas, este proceso tiene cinco etapas:

- 1.- Elección y acondicionamiento de la planta madre
- 2.- Establecimiento *in vitro* del explante mediante procedimientos de desinfección y adaptación al medio de cultivo
- 3.- Fase de multiplicación en donde se promueve la proliferación masiva de brotes mediante reguladores de crecimiento.
- 4.- Las vitroplantas son inducidas al desarrollo radicular a través del enraizamiento
- 5.- Finalmente se realiza la aclimatación y transferencia de plantas al sustrato bajo condiciones controladas de invernadero, lo que permite la estabilización progresiva de sus funciones fisiológicas y adaptación al ambiente externo.

2.2.2.4. Selección y manejo del explante

Los explantes son fragmentos de tejido vegetal utilizados como material inicial para el cultivo de tejidos o la micropropagación *in vitro*, por lo que seleccionarlos adecuadamente es crucial e influye directamente en el éxito del proceso. En la micropropagación se toman explantes de diferentes partes de la planta, entre ellas; los segmentos nodales, yemas axilares, ápices meristemáticos, hojas, tallos, brotes jóvenes. Sin embargo, para el cultivo de papa es más común utilizar segmentos nodales y meristemas, debido a que poseen células con alta capacidad de división y a su capacidad para regenerarse y producir material sano en cortos periodos de tiempo (Chimborazo Sangacha, 2026).

2.2.2.5. Multiplicación de los segmentos nodales

La multiplicación de los segmentos nodales consiste en el uso de partes del tallo que contienen yemas axilares con la capacidad de regenerar nuevas plantas. Este método permite una rápida proliferación vegetal bajo condiciones controladas, ya que cada segmento nodal puede dar origen a una planta clonal, generalmente idéntica genética y fisiológicamente a la planta madre (López Morales & Companioni González, 2024).

El uso de segmentos nodales en la micropropagación de *Solanum tuberosum* se debe a su estabilidad genética y a su alta capacidad para regenerarse, Esto gracias a que cada segmento posee tejidos meristemáticos activos que responden de manera eficiente ante los reguladores de crecimiento que se agregan en el medio de cultivo y favorecen a la propagación clonal (Guamán Quispe, 2022).

2.2.3. Establecimiento de las condiciones de cultivo *in vitro*

2.2.3.1. Medios de cultivo: Formulación de Murashige y Skoog (MS)

Los medios de cultivo son soluciones nutritivas que proporcionan elementos esenciales para el crecimiento de los tejidos vegetales *in vitro*, contienen sales minerales, vitaminas, reguladores de crecimiento y una fuente de carbono que por lo general es sacarosa (Rodríguez-Dominguez *et al.*, 2021).

El medio MS es uno de los más utilizados en el cultivo de tejidos vegetales debido a su alto contenido de nutrientes y es ampliamente empleado en la micropropagación de papa por su eficiencia en la inducción de crecimiento y desarrollo de explantes,

este medio fue desarrollado en 1962 durante estudios enfocados en identificar nuevos reguladores de crecimiento vegetal (George *et al.*, 2021).

2.2.3.2. Importancia y regulación de pH en el medio

Para cultivos de papa *in vitro* el pH ideal es de 5,8, y de este parámetro depende la solubilidad de las sales minerales y la consistencia del agente gelificante, por lo que debe ajustarse con precisión. Un pH fuera del rango puede precipitar fosfatos y sales de hierro, limitando su disponibilidad (López Gómez, 2019).

2.2.3.3. Control de la contaminación: uso de PPM

La presencia de contaminantes fúngicos y bacterianos endógenos o exógenos es una de las principales causas de pérdida de material biológico en los laboratorios de tejidos vegetales. Para mitigar este problema se opta por el uso del Plant Preservative Mixture (PPM), un biocida que puede adicionarse directamente a los medios de cultivo antes de la esterilización y permite controlar microorganismos latentes sin alterar los procesos de morfogénesis, siempre y cuando se manejen las concentraciones óptimas para evitar efectos fitotóxicos (Nezami Alanagh, 2024).

2.2.3.4. Factores ambientales en la sala de germinación: fotoperiodo y temperatura

Según Jácome Sarchi *et al.* (2026), el fotoperiodo y la temperatura constituyen factores microambientales determinantes en el desarrollo y capacidad regenerativa *in vitro* de papa. Durante las fases de establecimiento y multiplicación a partir de segmentos nodales, las condiciones óptimas comprenden un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad con temperaturas controladas entre 22 y 25 °C.

Estas condiciones favorecen la actividad fotosintética inicial de las vitroplantas, promoviendo un crecimiento uniforme y optimizando la respuesta fisiológica de los explantes frente a los reguladores de crecimiento presentes en el medio de cultivo. En este rango las citoquininas estimulan la división celular y la proliferación de brotes axilares, mientras que las giberelinas favorecen la elongación caulinar bajo condiciones de días largos.

Las alteraciones en el fotoperiodo y la temperatura pueden alterar significativamente la respuesta morfogénica de los explantes. Los fotoperiodos cortos promueven la tuberización y la formación de microtúbulos, mientras que las temperaturas por debajo del rango óptimo reducen la actividad metabólica y las tasas de

multiplicación. Por el contrario, las altas temperaturas pueden inducir estrés fisiológico, oxidación de los tejidos, crecimiento anormal e hiperhidricidad en las plantas.

La luz no solo constituye una fuente de energía para los tejidos fotosintéticamente activos, sino que también actúa como una señal reguladora del crecimiento y desarrollo vegetal. Durante el cultivo *in vitro*, el fotoperiodo influye directamente sobre la división celular, elongación de brotes, acumulación de biomasa y síntesis de fitohormonas. En papa, los fotoperiodos largos (16 horas luz/8 horas oscuridad) favorecen el crecimiento vegetativo y la elongación de los brotes, mientras que los fotoperiodos cortos promueven la inducción de tuberización y reducen el crecimiento aéreo (Nagy *et al.*, 2023).

El período de oscuridad también desempeña funciones fisiológicas importantes relacionadas con la respiración celular, redistribución de foto asimilados y regulación de genes involucrados en los ritmos circadianos. La alternancia adecuada entre luz y oscuridad permite mantener un equilibrio metabólico que favorece el desarrollo normal de las vitroplantas y mejora la respuesta a los reguladores de crecimiento presentes en el medio de cultivo (Paradiso & Proietti, 2022).

2.2.4. Reguladores de crecimiento y su efecto en el desarrollo *in vitro*

Para Zhang *et al.* (2023), los compuestos que regulan el crecimiento de las plantas son sustancias orgánicas que funcionan en cantidades mínimas y están implicados en el control de una variedad de procesos fisiológicos y morfológicos en las plantas. En el cultivo *in vitro* de *Solanum tuberosum* L., son cruciales para la división celular, el alargamiento, la diferenciación de tejidos, la creación de brotes y el desarrollo radicular, afectando directamente la respuesta de los explantes durante el proceso de cultivo *in vitro*.

Los reguladores de crecimiento vegetal actúan mediante complejas redes de señalización celular que controlan la expresión génica, la división celular y la diferenciación de tejidos. En condiciones *in vitro*, la aplicación exógena de fitohormonas compensa las limitaciones fisiológicas derivadas del aislamiento del explante respecto a la planta madre. Por esta razón, la concentración y combinación de reguladores de crecimiento determina el tipo de respuesta morfogénica obtenida, ya sea proliferación de brotes, elongación, formación de raíces o inducción de callos (Werner *et al.*, 2021). En la micropropagación de papa, las

citoquininas y giberelinas son particularmente importantes debido a su participación en la activación meristemática, crecimiento vegetativo y desarrollo estructural de las vitroplantas.

Las hormonas de crecimiento más empleadas en el cultivo de tejidos vegetales son las citoquininas, auxinas y giberelinas, ya que tienen la capacidad de fomentar el crecimiento y desarrollo de las plantas *in vitro*. Sin embargo, la respuesta morfogénica de los explantes está determinada por el tipo, la concentración y la interacción de las hormonas vegetales que se encuentran en el medio de cultivo, por lo que un equilibrio hormonal adecuado es elemento clave para mejorar la eficacia de la micropropagación y obtener plantas robustas y con un buen desarrollo.

2.2.4.1. Citoquininas

Las citoquininas son fitohormonas fundamentales en el crecimiento y desarrollo de *Solanum tuberosum* L., éstas se encargan de regular los procesos relacionados con la división celular, activación meristemática y proliferación de brotes. En el cultivo *in vitro*, estas hormonas estimulan la multiplicación de segmentos nodales y la inducción de yemas axilares que favorecen la regeneración y propagación clonal de vitroplantas (Figura 1). Entre las citoquininas más utilizadas en la micropropagación se destacan la 6-bencilaminopurina (BAP) y la kinetina, las cuales incrementan la tasa de multiplicación y el desarrollo vegetativo de los explantes. Sin embargo, concentraciones elevadas pueden generar alteraciones fisiológicas como hiperhidricidad, deformación de tejidos y reducción del crecimiento radicular. Además, las citoquininas interactúan con otras fitohormonas, especialmente las giberelinas, regulando procesos morfogénicos y el crecimiento vegetativo durante la micropropagación de papa (Saidi y Hajibarat, 2021).

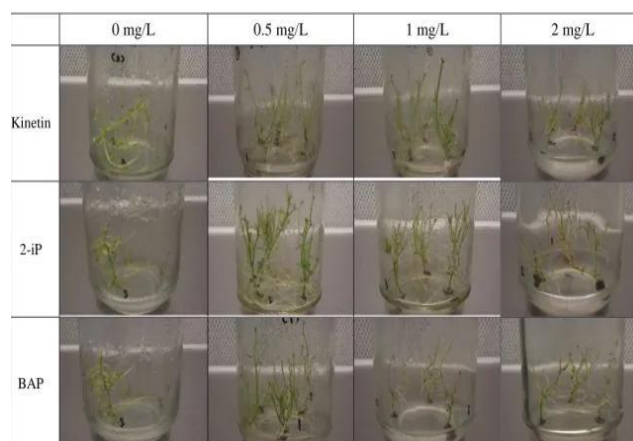


Figura 1. Etapas de propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L., mediante segmentos nodales y regeneración de brotes

Fuente: Adaptado de Adly *et al.* (2023)

2.2.4.2. Giberelinas

Las giberelinas son fitohormonas que desempeñan un papel fundamental en los procesos de crecimiento y desarrollo vegetal, especialmente en la elongación celular, expansión de los entrenudos y desarrollo vegetativo de las plantas. En la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L., estas hormonas favorecen el alargamiento de brotes y tallos, contribuyendo al vigor y crecimiento aéreo de las vitroplantas (Figura 2). El GA₃ es una de las giberelinas más utilizadas en cultivos de tejidos vegetales debido a su capacidad para estimular la elongación caular y mejorar la respuesta morfogénica de los explantes.

No obstante, concentraciones elevadas de GA₃ pueden provocar un crecimiento excesivo de los brotes, originando plantas débiles y fisiológicamente inestables. Además, las giberelinas interactúan con otras fitohormonas como las citoquininas y auxinas, regulando procesos relacionados con la división celular, diferenciación tisular y desarrollo vegetativo. En la micropropagación de papa, el balance adecuado entre giberelinas y otros reguladores de crecimiento resulta esencial para optimizar la regeneración y calidad de las vitroplantas (Saidi y Hajibarat, 2021).

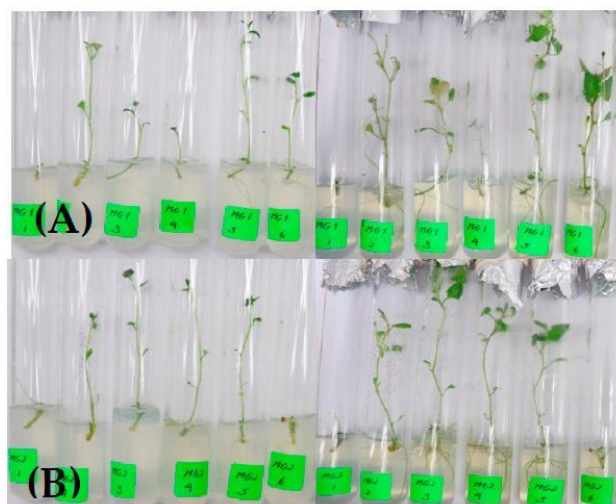


Figura 2. Plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* var. Cecilia durante la etapa de multiplicación en medio MS con GA₃

Fuente: Adaptado de Silva Agurto *et al.* (2024)

2.2.4.3. Interacción Citoquinina-Giberelina en el Cultivo de Papa

La interacción entre citoquininas y giberelinas constituye uno de los mecanismos hormonales más importantes en el desarrollo y crecimiento de *Solanum tuberosum* L., debido a que la respuesta morfogénica de los tejidos cultivados *in vitro* no depende únicamente de la acción individual de un regulador de crecimiento, sino del equilibrio fisiológico generado entre diferentes fitohormonas. En este contexto, la combinación de BAP y GA₃, regula simultáneamente la inducción y proliferación de brotes axilares, así como el crecimiento vegetativo de las plantas, favoreciendo una regeneración más eficiente y evitando alteraciones morfológicas asociadas a desbalances hormonales, como plántulas enanas por exceso de citoquininas o brotes excesivamente delgados por predominio de giberelinas.

Asimismo, diversos estudios han demostrado que existe una interacción fisiológica recíproca entre ambas fitohormonas, donde las citoquininas pueden inhibir parcialmente la biosíntesis de giberelinas y aumentar su desviación, mientras que las giberelinas modulan ciertas respuestas inducidas por las citoquininas, regulando procesos relacionados con la diferenciación celular, actividad meristemática y desarrollo de tejidos vegetales. Por esta razón, la eficiencia de multiplicación, el vigor de las vitroplantas y el adecuado desarrollo morfológico dependen de una correcta concentración e interacción entre estos reguladores de crecimiento en el medio de cultivo, siendo necesario optimizar su balance para obtener plantas de alta calidad fitosanitaria y genética (Saidi y Hajibarat, 2021; Zhang *et al.*, 2023).

Adicionalmente, si bien el GA₃ corrige las anomalías de crecimiento compactado (entrenudos muy cortos) generadas por el BAP, es importante señalar que las citoquininas actúan promoviendo la actividad de la enzima ACC sintasa, precursora de la biosíntesis de etileno; por tanto, cuando esta activación no es contrarrestada adecuadamente por la giberelina, el estrés oxidativo resultante en explantes sensibles desata procesos de vitrificación (hiperhidricidad) (Chukwuka *et al.*, 2025).

2.2.4.4. Vigor de las plantas *in vitro*

El vigor vegetal en condiciones asépticas se define como la capacidad potencial de un explante o plántula para manifestar un crecimiento rápido, uniforme y metabólicamente activo bajo un entorno controlado de cultivo. En los sistemas de micropropagación, el vigor no solo representa una respuesta morfológica aislada, sino que se consagra como un indicador directo de la calidad fisiológica de las vitroplantas. Este parámetro predice la competencia de los brotes para desarrollar estructuras vegetativas funcionales y tejidos fotosintéticamente activos, variables críticas que determinan la tasa de supervivencia, el enraizamiento y el éxito adaptativo durante la transferencia a las fases posteriores de aclimatación *ex vitro* (George *et al.*, 2021).

En el cultivo de *Solanum tuberosum* L., el vigor de las vitroplantas se encuentra estrechamente condicionado por la interacción de factores genotípicos, el suministro nutricional del medio basal y el balance exógeno de fitohormonas. La manipulación combinada de citoquininas y giberelinas ejerce un papel morfogenético fundamental sobre la arquitectura del brote. Mientras que las citoquininas (como el BAP) estimulan la división celular en los meristemas axilares y promueven la proliferación de yemas, las giberelinas (como el GA₃) desencadenan la elongación de los entrenudos mediante la distensión celular y rompen la dominancia apical. Un equilibrio óptimo entre ambos reguladores de crecimiento previene anomalías como la vitrificación (hiperhidricidad) y permite la obtención de plántulas robustas, con tallos de diámetro adecuado, hojas expandidas y una óptima acumulación de biomasa (Leiva Mora, 2024).

En las evaluaciones biotecnológicas orientadas a la producción de semilla prebásica de papa, el vigor se cuantifica a través de índices macro-morfológicos reproducibles. La evaluación del vigor morfológico permite clasificar las plantas *in vitro* de acuerdo con características visuales relacionadas con su desarrollo y calidad (Figura 3). Las

variables analizadas con mayor frecuencia integran la longitud final del brote, el diámetro axial del tallo, el número de hojas emitidas, el índice de clorofila o coloración foliar, y la velocidad de regeneración radicular. La integración cuantitativa de estos caracteres fenotípicos permite establecer estándares de calidad; valores elevados en estos descriptores morfológicos correlacionan de forma positiva con una mayor resistencia al estrés por trasplante y un incremento en la eficiencia fotosintética y mitocondrial de las plántulas al abandonar las condiciones de alta humedad relativa y heterotrofía del laboratorio (Jácome Sarchi *et al.*, 2026).

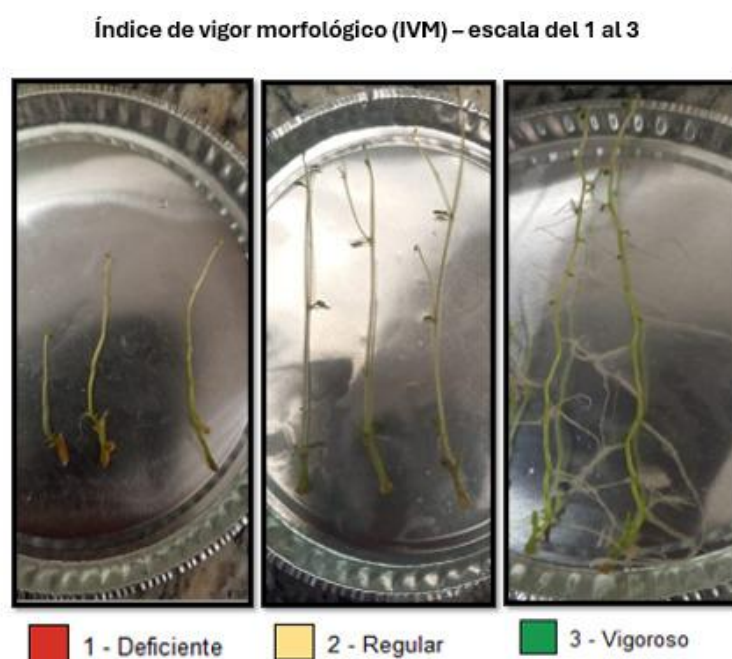


Figura 3. Escala de evaluación del Índice de Vigor Morfológico (IVM) de las plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L.

2.2.5. Alteraciones fisiológicas asociadas a la micropropagación

2.2.5.1. Vitrificación

La hiperhidricidad o vitrificación es un trastorno fisiológico frecuente en el cultivo *in vitro* de plantas, caracterizado por la formación de tejidos acuosos, translúcidos y frágiles que alteran el crecimiento y desarrollo normal de las vitroplantas. Este desorden afecta negativamente la calidad morfológica de los explantes y disminuye la capacidad de supervivencia durante la etapa de aclimatación. Las plantas afectadas presentan características morfológicas visibles, como tejidos translúcidos, tallos engrosados y hojas deformadas (Figura 4). En la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L., la vitrificación suele producirse como consecuencia de

condiciones inadecuadas del medio de cultivo y del entorno de incubación, incluyendo una humedad relativa excesiva, una ventilación deficiente de los recipientes, altas concentraciones de sales minerales y el uso excesivo de reguladores del crecimiento, especialmente citoquininas. Estas condiciones generan alteraciones anatómicas y metabólicas en los tejidos vegetales, lo que se traduce en tallos engrosados, hojas deformadas y estructuras celulares débiles.

Diversos estudios han demostrado que las plantas vitrificadas presentan alteraciones en el intercambio gaseoso, la actividad fotosintética y la organización celular debido a la acumulación excesiva de agua en los espacios intercelulares. Además, este fenómeno se asocia con desequilibrios hormonales y estrés oxidativo durante el cultivo *in vitro*. Para reducir su impacto en la micropropagación, se recomienda optimizar la composición del medio de cultivo, regular las concentraciones de citoquininas y mejorar la ventilación de los recipientes. Estas estrategias favorecen la producción de plántulas con un mejor desarrollo morfológico y una mayor adaptabilidad a las condiciones *ex vitro* (Polivanova y Bedarev, 2022).



Figura 4. Hiperhidricidad (vitrificación) en una planta *in vitro* de *Solanum tuberosum* L

2.2.5.2. Formación de callo

La formación de callos en *Solanum tuberosum* L. dependen del equilibrio fisiológico generado por la interacción de los reguladores del crecimiento en el medio de cultivo. En este sistema, la 6-bencilaminopurina (BAP) activa la división celular y la proliferación de yemas axilares, mientras que el ácido giberélico (GA_3) promueve la elongación celular y el desarrollo vigoroso de los brotes. Sin embargo,

concentraciones elevadas o desequilibradas de esta combinación hormonal pueden inducir anomalías como hiperhidricidad o formación excesiva de callos (Figura 5). Por lo tanto, optimizar la proporción BAP/GA₃ en los segmentos nodales es un factor determinante para maximizar la eficiencia de la micropropagación, asegurando la calidad morfológica y el vigor de las plántulas (Gualpa J. M., 2023).



Figura 5. Formación de callo en un explante *in vitro* de *Solanum tuberosum* L

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1.1. Enfoque

Esta investigación se llevó a cabo mediante un enfoque cuantitativo con alcance experimental, evaluando el efecto de diferentes concentraciones de citoquinina (BAP) y giberelina (GA_3) en la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad "Superchola", utilizando segmentos nodales como explantes en condiciones de laboratorio controladas. El estudio arrojó datos medibles y comparables relacionados con el crecimiento, el desarrollo y la calidad morfológica de las plántulas.

Para evaluar la eficiencia de la micropropagación, se analizaron variables cuantitativas como la longitud del brote, la tasa de multiplicación, el número de nudos, el diámetro del tallo, la biomasa fresca, la biomasa seca, la materia seca y el índice de calidad general. También se consideraron variables cualitativas y descriptivas relacionadas con el vigor, la hiperhidricidad y la formación de callos, mediante observaciones visuales y escalas de evaluación morfológica. La integración de estos parámetros permitió determinar la respuesta morfogénica de los explantes a las diferentes combinaciones hormonales aplicadas en el medio de cultivo.

3.1.2. Tipo de Investigación

La investigación fue de carácter experimental, ya que se manipuló deliberadamente la concentración de los reguladores del crecimiento vegetal 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido giberélico (GA_3) en el medio de cultivo MS para evaluar su efecto en la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad 'Superchola'. Los tratamientos hormonales se aplicaron en condiciones de laboratorio controladas, lo que permitió analizar su influencia en variables relacionadas con la regeneración, la multiplicación, la elongación, el vigor y la calidad morfofisiológica de las plántulas obtenidas a partir de segmentos nodales.

3.2. HIPÓTESIS

Hipótesis alternativa (H1)

La interacción de (BAP) y (GA₃) influye de manera significativa sobre la tasa de multiplicación y morfofisiología de la papa *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola en condiciones de cultivo *in vitro*

Hipótesis nula (H0)

La interacción de BAP y GA₃ no influye de manera significativa sobre la tasa de multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1. Definición de variables

Variable independiente

- Concentración de citoquininas (BAP)
- Concentración de Giberelinas (GA₃)

Variable dependiente

- Longitud de brotes (cm)
- Número de brotes por explante
- Número de nudos por brote
- Diámetro de tallo (mm)
- Hiperhidricidad
- Biomasa fresca (g),
- Biomasa seca (g)
- Porcentaje de materia seca
- Vigor de las plántulas
- Formación de callo
- Índice de calidad global.

3.3.2. Operacionalización de variables

Tabla 2. Operacionalización de variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
Independiente Citoquinina (BAP)	Dosis baja	Aplicación de 0,5 mg/L de BAP en el medio de cultivo MS	Preparación de medio de cultivo	Micropipeta
	Dosis media	Aplicación de 1,0 mg/L de BAP en el medio de cultivo MS	Preparación de medio de cultivo	Micropipeta
	Dosis alta	Aplicación de 2,0 mg/L de BAP en el medio de cultivo MS	Preparación de medio de cultivo	Micropipeta
Independiente Giberelina (GA3)	Sin aplicación	0,0 mg/L de GA3 en el medio de cultivo	Preparación de medio de cultivo	Micropipeta
	Dosis baja	Aplicación de 0,1 mg/L de GA3 en el medio de cultivo	Preparación de medio de cultivo	Micropipeta
	Dosis media	Aplicación de 0,25 mg/L de GA3 en el medio de cultivo	Preparación de medio de cultivo	Micropipeta
Dependiente Eficiencia de la micropropagación	Longitud del brote	Medición en cm del brote principal desde la base hasta el ápice a los 7, 14, 21, 28 días después de la siembra.	Medición directa	Regla milimetrada/ calibrador
	Tasa de multiplicación	Número de brotes por explante evaluados a los 7, 14, 21, 28 días después de la siembra.	Observación directa y conteo	Lupa Hoja de registro
	Número de nudos	Conteo de nudos por brote a los 7, 14, 21, 28 días después de la siembra.	Observación directa y conteo	Hoja de registro
	Hiperhidricidad	Porcentaje de brotes con apariencia vítrea en el día 28 después de la siembra.	Observación visual	Hoja de registro
	Diámetro de tallo	Grosor del tallo principal (en mm) medido en el tercio medio del brote.	Observación visual	Hoja de registro
	Biomasa fresca	Peso húmedo total (en g) de las plántulas por frasco inmediatamente después de la extracción del medio de cultivo en el día 28 después de la siembra.	Pesaje	Balanza
	Biomasa seca	Peso residual (en g) tras la deshidratación completa del tejido vegetal.	Secado y pesaje	Estufa y Balanza
	Vigor	Escala de 1 a 3 según apariencia (color, firmeza, desarrollo) en el día 28 después de la siembra.	Evaluación visual	Escala descriptiva Hoja de registro
	Formación de callo	Porcentaje de explantes con callo, en el día 28 después de la siembra.	Observación visual	Hoja de registro

3.4. MÉTODOS UTILIZADOS

3.4.1. Área de estudio

La presente investigación se desarrolló en el Laboratorio 201 de Microbiología de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC), ubicada en la ciudad de Tulcán, cantón Tulcán, provincia del Carchi, Ecuador. Geográficamente, la ciudad de Tulcán se localiza en las coordenadas 0,81187° de latitud Norte y -77,71727° de longitud Oeste, a una altitud aproximada de 2.950 m s. n. m. (LatLong.info, 2023) (Figura 6).

La fase experimental se llevó a cabo bajo condiciones controladas dentro del Laboratorio 201 de Microbiología, empleando un área de crecimiento acondicionada para el establecimiento y desarrollo *in vitro* de segmentos nodales de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola. El material vegetal se mantuvo en un cuarto de crecimiento con una temperatura controlada entre 20 y 22 °C, un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad, y una intensidad lumínica aproximada de 2.500 a 3.000 lux. (Pineda Lázaro *et al.*, 2021)

Las condiciones de infraestructura en el equipamiento y control ambiental disponibles en el laboratorio permitieron evaluar el efecto de la interacción entre la 6-bencilaminopurina (BAP) y el ácido giberélico (GA₃) sobre la eficiencia de la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.



Figura 6. Ubicación del experimento
Fuente: (Adaptado de MapCarta, 2026)

3.4.2. Tratamientos del diseño experimental

Para el desarrollo de la presente investigación se empleó un diseño experimental completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 3x3 correspondiente a la interacción entre diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido giberélico (GA₃) en la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.

El estudio estuvo conformado por dos factores experimentales: el Factor A correspondiente a las concentraciones del BAP y el Factor B relacionado con las concentraciones de GA₃. La combinación de ambos factores generó un total de nueve tratamientos experimentales evaluados bajo condiciones controladas de laboratorio.

Cada tratamiento estuvo constituido por 20 repeticiones con 4 explantes utilizando segmentos nodales establecidos en medio de cultivo Murashige & Skoog (MS) suplementado con los respectivos reguladores de crecimiento.

La distribución y codificación de los tratamientos se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3. Tratamientos del experimento

Tratamientos	Factor A: BAP (mg/L)	Factor B: GA3 (mg/L)	Repeticiones de tratamientos	Total, de explantes por tratamiento
T1	0,5	0,00	20	80
T2	0,5	0,1	20	80
T3	0,5	0,25	20	80
T4	1,0	0,00	20	80
T5	1,0	0,1	20	80
T6	1,0	0,25	20	80
T7	2,0	0,00	20	80
T8	2,0	0,1	20	80
T9	2,0	0,25	20	80

3.4.3. Características y distribución del diseño experimental

Para el desarrollo de la presente investigación se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 3 × 3, correspondiente a la interacción entre tres concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP) y tres concentraciones de ácido giberélico (GA₃) en la micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.

El experimento estuvo constituido por nueve tratamientos distribuidos en 20 repeticiones experimentales por tratamiento obteniéndose un total de 180 unidades experimentales. La población experimental estuvo conformada por la totalidad de

las 180 unidades experimentales (frascos de vidrio) establecidas durante la investigación. Debido a que se trabajó con todos los frascos disponibles para el estudio, no se realizó un proceso de muestreo; por lo tanto, la muestra coincidió con la población experimental, considerándose el 100 % de las unidades experimentales para la recolección y análisis de los datos. Además, cada unidad experimental estuvo conformada por un frasco de vidrio conteniendo cuatro explantes nodales establecidos en medio de cultivo Murashige & Skoog (MS) suplementado con las respectivas concentraciones hormonales. En total se utilizaron 720 explantes nodales durante la investigación.

Los frascos fueron establecidos bajo condiciones controladas dentro del área de crecimiento del laboratorio, manteniendo temperatura, fotoperiodo y humedad relativa adecuadas para el desarrollo *in vitro* de las plantas. La distribución de los tratamientos se realizó de forma aleatoria dentro de la cámara de crecimiento con el propósito de minimizar posibles efectos asociados a variaciones microambientales de luz, temperatura o ubicación de los frascos.

Para la evaluación de las variables morfofisiológicas y fisiológicas se consideraron los explantes establecidos en cada unidad experimental, registrándose variables relacionadas con multiplicación, elongación, vigor morfológico, biomasa, hiperhidricidad y formación de callo.

A continuación, se detallan las características técnicas consolidadas del experimento.

Tabla 4. Características del experimento

Características	Dimensiones / Cantidad
Diseño estadístico	DCA con arreglo factorial 3 × 3
Tratamientos	9
Repeticiones	20
Unidades experimentales totales	180
Explantos por unidad experimental	4
Total, de explantes por tratamiento	80
Número total de explantes	720
Medio de cultivo	Murashige & Skoog (MS)
Tipo de explante	Segmentos nodales
Unidad experimental	Frasco de vidrio con 4 explantes
Condiciones experimentales	Temperatura, fotoperiodo y humedad controladas

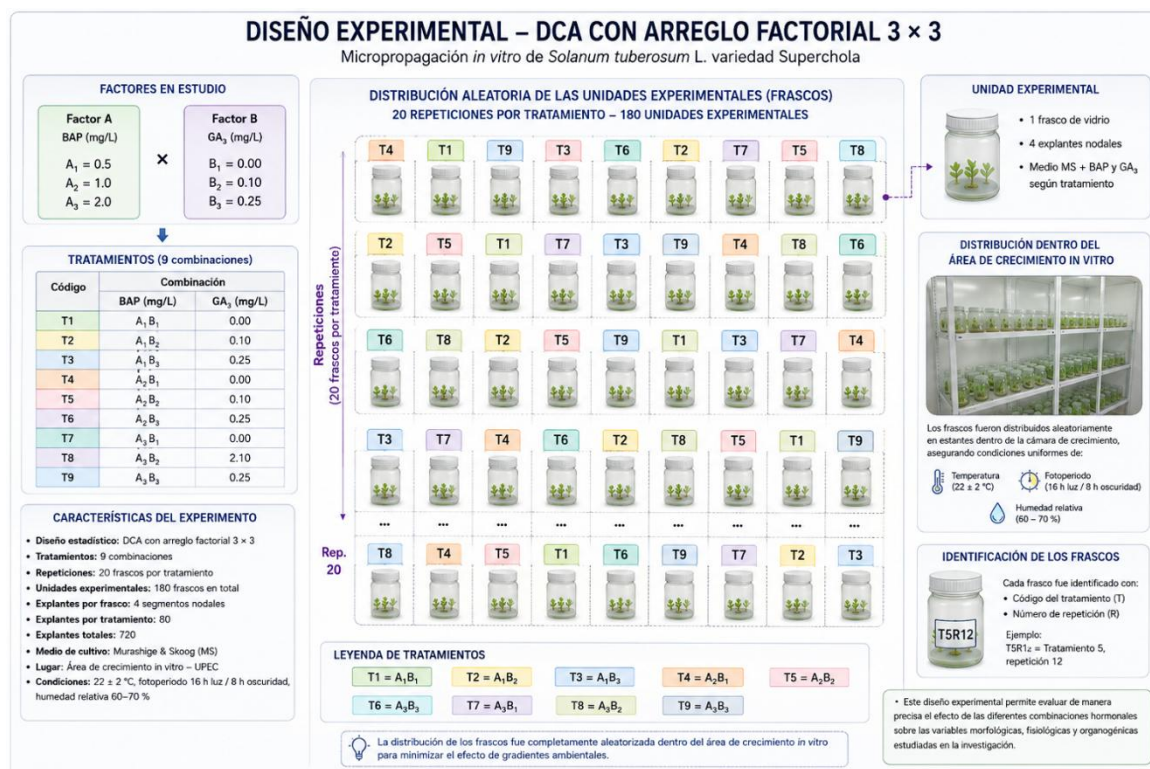


Figura 7. Distribución y croquis del experimento en el Laboratorio (UPEC) de Biotecnología Vegetal

3.4.4. Procedimientos

3.4.4.1. Obtención y selección del material vegetal

El material vegetal utilizado en la presente investigación correspondió a *plantas in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola, obtenidas del Laboratorio de Biotecnología Vegetal del Programa Nacional de Raíces y Tubérculos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), perteneciente a la Estación Experimental Santa Catalina, ubicada en la ciudad de Quito, Ecuador.

La solicitud del material vegetal fue realizada previamente al INIAP, donde las vitroplantas fueron establecidas y multiplicadas bajo condiciones controladas de laboratorio durante un período aproximado de uno y medio a dos meses, con el fin de obtener plantas con adecuado desarrollo vegetativo y condiciones fitosanitarias óptimas para su utilización en la fase experimental.

Una vez alcanzado el crecimiento requerido, las vitroplantas fueron entregadas en tubos de ensayo debidamente identificados y trasladadas al Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC), procurando mantener condiciones adecuadas que garantizaran la viabilidad y calidad del material vegetal durante el transporte.

Posteriormente, se realizó una evaluación visual del material recibido, verificando su estado fitosanitario, uniformidad morfológica y ausencia de contaminación visible. A partir de las vitroplantas seleccionadas se obtuvieron segmentos nodales vigorosos y homogéneos, los cuales fueron destinados al desarrollo de los tratamientos experimentales de la investigación.

3.4.4.2. Preparación del medio de cultivo

Se preparó el medio de cultivo basal Murashige & Skoog (MS) utilizando las sales minerales y vitaminas correspondientes a la formulación estándar. Para la preparación general del medio se elaboraron 800 mL de agua destilada, incorporando sacarosa como fuente de carbono, agar como agente gelificante y ppm.

Posteriormente, el pH del medio fue ajustado a 5,8 y el medio preparado fue esterilizado en autoclave a 121 °C y 15 psi durante 20 minutos. Una vez esterilizado y enfriado el medio de cultivo, se adicionaron las diferentes concentraciones hormonales de 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido giberélico (GA₃) correspondientes a cada tratamiento experimental.

La incorporación de las hormonas se realizó posteriormente al proceso de autoclavado con la finalidad de evitar la degradación de los reguladores de crecimiento por efecto de la temperatura. Finalmente, el medio de cultivo fue distribuido bajo condiciones asépticas dentro de la cámara de flujo laminar, colocando 40 ml en cada frasco de vidrio para el establecimiento de los explantes nodales.

3.4.4.3. Esterilización de materiales y medios

Los frascos de vidrio, instrumentos de disección y materiales de laboratorio fueron esterilizados en autoclave a 121 °C y 15 psi durante 20 minutos para garantizar condiciones asépticas durante el establecimiento de los explantes. Asimismo, todas las manipulaciones se realizaron bajo cámara de flujo laminar previamente desinfectada con alcohol al 70 %.

3.4.4.4. Siembra de los explantes

La siembra se realizó bajo condiciones asépticas dentro de la cámara de flujo laminar. En cada frasco de vidrio se establecieron cuatro segmentos nodales sobre el medio de cultivo correspondiente según el tratamiento evaluado. Posteriormente, los

frascos fueron sellados e identificados mediante códigos y etiquetas para facilitar el seguimiento experimental.

3.4.4.5. Distribución de los tratamientos

Los frascos correspondientes a los nueve tratamientos fueron distribuidos completamente al azar dentro del área de crecimiento *in vitro*. Cada tratamiento estuvo conformado por 20 repeticiones, obteniéndose un total de 180 unidades experimentales. La aleatorización permitió minimizar posibles variaciones ambientales dentro de la estantería.

3.4.4.6. Condiciones de crecimiento *in vitro*

Las unidades experimentales fueron mantenidas en estanterías de crecimiento bajo condiciones controladas de laboratorio, con una temperatura de 20 a 22 °C, fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad, y humedad relativa entre 60 y 70 %. Estas condiciones permitieron favorecer el desarrollo fisiológico y morfogénico de las vitroplantas durante la fase de multiplicación *in vitro*.

3.4.4.7. Monitoreo y evaluación de las vitroplantas

Durante el periodo experimental se realizaron evaluaciones periódicas del desarrollo de las vitroplantas para registrar las variables morfológicas, fisiológicas y organogénicas establecidas en la investigación. Las observaciones permitieron identificar diferencias en vigor, elongación, formación de brotes, hiperhidricidad y callogénesis entre tratamientos.

3.4.4.8. Variables evaluadas

Durante el desarrollo de la investigación se evaluaron variables morfológicas, fisiológicas y organogénicas en las plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola. Estas variables permitieron determinar la respuesta de los explantes a las diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido giberélico (GA₃) aplicadas en los tratamientos experimentales.

3.4.4.9. Número de brotes

El número de brotes se determinó mediante el conteo directo de los brotes generados por cada explante establecido en las unidades experimentales. Las evaluaciones se realizaron a los 7, 14, 21 y 28 días después de la siembra *in vitro*, con la finalidad de monitorear la capacidad de multiplicación inducida por las diferentes

concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido giberélico (GA_3). Esta variable permitió evaluar la respuesta organogénica y el potencial de multiplicación de las vitroplantas desarrolladas bajo condiciones *in vitro*.

3.4.4.10. Número de nudos

El número de nudos se cuantificó mediante observación directa en cada vitroplantas desarrollada dentro de los tratamientos experimentales. Las evaluaciones se efectuaron a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo *in vitro*. Esta variable permitió determinar el desarrollo vegetativo de las vitroplantas y estimar el potencial de propagación futura mediante segmentos nodales.

3.4.4.11. Longitud de vitroplantas (cm)

La longitud de las vitroplantas se midió utilizando una regla milimetrada, registrando la distancia desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento. Las mediciones se realizaron a los 7, 14, 21 y 28 días después del establecimiento *in vitro*. Esta variable permitió evaluar el efecto de las diferentes concentraciones hormonales sobre la elongación y crecimiento vegetal de las vitroplantas.

3.4.4.12. Diámetro de tallo (mm)

El diámetro del tallo fue medido utilizando un calibrador Vernier en la parte media de cada vitroplantas. La evaluación se realizó únicamente a los 28 días de cultivo *in vitro*. Esta variable se utilizó como indicador del vigor fisiológico y la robustez estructural de las vitroplantas desarrolladas bajo las diferentes combinaciones hormonales.

3.4.4.13. Biomasa fresca (g)

La biomasa fresca se determinó a los 28 días después del establecimiento *in vitro* mediante el pesaje inmediato de las vitroplantas utilizando una balanza analítica de precisión. Previamente, las vitroplantas fueron extraídas cuidadosamente del medio de cultivo para eliminar residuos de agar adheridos a los tejidos vegetales. Esta variable permitió evaluar la acumulación de biomasa vegetal producida bajo cada tratamiento experimental.

3.4.4.14. Biomasa seca (g)

Para la determinación de biomasa seca, las vitroplantas evaluadas fueron extraídas cuidadosamente de los frascos a los 28 días después del establecimiento *in vitro*.

Posteriormente, los explantes correspondientes a cada unidad experimental fueron colocados en fundas de papel utilizadas para secado en estufa.

Las muestras fueron sometidas a secado en estufa a temperatura constante durante un periodo aproximado de 24 a 48 horas, hasta alcanzar peso constante y eliminar el contenido de humedad presente en los tejidos vegetales. Finalizado el proceso de secado, se realizó el pesaje utilizando una balanza analítica de precisión para obtener el valor de biomasa seca correspondiente a cada tratamiento experimental.

Esta variable permitió determinar la cantidad real de materia orgánica acumulada en las vitroplantas desarrolladas bajo condiciones *in vitro*.

3.4.4.15. Porcentaje de materia seca (%)

El porcentaje de materia seca se calculó posteriormente a la obtención de los valores de biomasa fresca y biomasa seca mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Materia seca (\%)} = \left(\frac{\text{Biomasa seca}}{\text{Biomasa fresca}} \right) \times 100$$

Esta variable permitió evaluar el grado de organización estructural, acumulación de tejidos y estabilidad fisiológica de las vitroplantas obtenidas bajo las diferentes combinaciones hormonales durante la fase de multiplicación *in vitro*.

3.4.4.16. Índice de vigor morfológico (IVM)

El índice de vigor morfológico se determinó mediante evaluación visual de las vitroplantas a los 28 días después del establecimiento *in vitro*. Para esta evaluación se consideraron características como coloración, desarrollo estructural, vigor general, uniformidad y apariencia fisiológica de las vitroplantas obtenidas en cada tratamiento experimental.

La evaluación del vigor se realizó utilizando una escala cualitativa de tres categorías:

- **1 = Deficiente:** vitroplantas con escaso desarrollo, coloración deficiente o alteraciones fisiológicas visibles.
- **2 = Regular:** vitroplantas con desarrollo moderado y características fisiológicas aceptables.
- **3 = Vigoroso:** vitroplantas con buen desarrollo estructural, coloración uniforme y adecuada apariencia fisiológica.

Posteriormente, los datos obtenidos fueron utilizados para determinar el índice de vigor morfológico (IVM) correspondiente a cada tratamiento experimental.

3.4.4.17. Incidencia de hiperhidricidad (%)

La hiperhidricidad se evaluó a los 28 días de cultivo *in vitro* mediante observación visual de las vitroplantas que presentaron tejidos translúcidos, acuosos, quebradizos o con apariencia vítrea, características típicas de este desorden fisiológico.

Los resultados fueron expresados como porcentaje de explantes afectados por tratamiento experimental, permitiendo determinar el efecto de las diferentes concentraciones hormonales sobre la estabilidad fisiológica de los tejidos cultivados *in vitro*.

3.4.4.18. Formación de callo (Callogénesis) (%)

La formación de callo se evaluó a los 28 días después del establecimiento *in vitro* mediante observación directa de la presencia de tejido calloso en la base de los explantes nodales.

Los resultados fueron expresados como porcentaje de explantes con presencia de callo por tratamiento experimental. Esta variable permitió evaluar la respuesta organogénica inducida por las diferentes combinaciones hormonales y determinar la incidencia de procesos de dediferenciación celular durante el cultivo *in vitro*.

3.4.4.19. Índice de calidad

El índice de calidad se determinó posteriormente al registro de todas las variables morfológicas evaluadas durante la investigación. Para su cálculo se utilizaron los datos correspondientes a la longitud de vitroplantas y número de brotes obtenidos a los 28 días de cultivo *in vitro*.

El índice fue calculado mediante la relación entre la longitud de la vitroplantas y el número de brotes utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{índice de calidad} = \text{Longitud de planta D}_{28} / \text{Numero de brotes D}_{28}$$

Esta variable permitió evaluar de manera integral la calidad morfológica y fisiológica de las vitroplantas obtenidas bajo las diferentes combinaciones hormonales, considerando simultáneamente el crecimiento vegetal y la capacidad de multiplicación durante la fase de micropropagación *in vitro*.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los datos obtenidos en la presente investigación se realizó utilizando el software RStudio, considerando un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial 3×3 , correspondiente a la interacción entre tres concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP: 0,5; 1,0 y 2,0 mg/L) y tres concentraciones de ácido giberélico (GA₃: 0,00; 0,10 y 0,25 mg/L), generando un total de nueve tratamientos evaluados en plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola. Inicialmente, se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Debido a que los datos no cumplieron los supuestos requeridos para la aplicación de pruebas paramétricas, se emplearon métodos estadísticos no paramétricos. Para las variables cuantitativas se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). El Índice de Vigor Morfológico (IVM) también fue analizado mediante la prueba de Kruskal-Wallis, complementada con comparaciones múltiples ajustadas por Bonferroni. Por su parte, las variables hiperhidricidad y callogénesis fueron evaluadas mediante Modelos Lineales Generalizados (GLM) con distribución binomial y función de enlace logit, determinando las diferencias estadísticas mediante la prueba de Wald y comparaciones múltiples de Tukey. Finalmente, los resultados se presentaron en tablas y gráficos, considerando los siguientes niveles de significancia: Altamente Significativo ($p < 0,001$), Muy Significativo ($p < 0,01$), Significativo ($p < 0,05$) y No Significativo ($p > 0,05$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Variable de Brotes

El análisis estadístico general mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 5) determinó la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados para la variable número de brotes en micro plántulas de *Solanum tuberosum* L. durante las diferentes fechas de evaluación. Los valores de significancia obtenidos fueron: D7 (Altamente Significativo, $p < 0,001$), D14 (Altamente Significativo, $p < 0,001$), D21 (Altamente Significativo, $p < 0,001$) y D28 (Altamente Significativo, $p < 0,001$), evidenciando diferencias altamente significativas entre tratamientos para todas las evaluaciones realizadas.

Tabla 5. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el número de brotes en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. evaluadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo

	Tratamientos Dosis (BAP + GA ₃)	Brotes_D7	Grupo (D7)	Brotes_D14	Grupo (D14)	Brotes_21	Grupo (D21)	Brotes_28	Grupo (D28)
T1	0,5 BAP - 0,0 GA ₃	1,00	ab	1,00	c	1,21	bcd	1,53	de
T2	0,5 BAP - 0,1 GA ₃	0,97	ab	1,17	abc	1,46	b	2,01	bc
T3	0,5 BAP - 0,25 GA ₃	0,98	ab	1,16	a	2,13	a	2,46	ab
T4	1,0 BAP - 0,0 GA ₃	0,91	bc	1,02	bc	1,26	bcd	1,46	de
T5	1,0 BAP - 0,1 GA ₃	0,96	abc	1,15	ab	2,06	a	2,76	a
T6	1,0 BAP - 0,25 GA ₃	0,93	abc	1,00	c	1,07	cd	1,23	e
T7	2,0 BAP - 0,0 GA ₃	0,85	c	0,98	c	1,00	d	1,13	e
T8	2,0 BAP - 0,1 GA ₃	1,02	a	1,01	bc	1,28	bc	1,81	cd
T9	2,0 BAP - 0,25 GA ₃	0,93	abc	1,00	c	1,22	bcd	1,42	e

Nota. Los valores representan el promedio del número de brotes. Letras iguales en una misma columna indican que no existen diferencias significativas entre tratamientos, mientras que letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Durante la evaluación realizada a los 7 días de cultivo, los tratamientos presentaron valores relativamente homogéneos, observándose promedios entre 0,85 y 1,02 brotes. El tratamiento T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) registró el mayor promedio de brotes con 1,02, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"). En contraste, el tratamiento T7 presentó el menor promedio con 0,85 brotes, perteneciendo al grupo estadístico "c". Los tratamientos restantes compartieron grupos intermedios de significancia, indicando diferencias parciales entre tratamientos.

A los 14 días de evaluación se evidenció un incremento progresivo en la formación de brotes. El tratamiento T2 presentó el mayor promedio con 1,17 brotes, mientras que T3 alcanzó 1,16 brotes y perteneció al grupo estadístico superior ("a"). Por otro lado, los tratamientos T6, T7 y T9 registraron los menores valores promedio, ubicándose dentro del grupo estadístico "c". Estos resultados indican que concentraciones moderadas de BAP combinadas con bajas dosis de GA₃ favorecieron la emisión temprana de brotes.

En la evaluación realizada a los 21 días de cultivo se observó una mayor diferenciación entre tratamientos. El tratamiento T3 presentó el mayor promedio con 2,13 brotes, seguido de T5 con 2,06 brotes, ambos pertenecientes al grupo estadístico

superior ("a"). En contraste, el tratamiento T7 presentó el menor promedio con 1,00 brote, ubicándose dentro del grupo estadístico "d". Los tratamientos restantes compartieron grupos intermedios ("bc", "bcd" y "cd"), reflejando respuestas parciales en la capacidad de multiplicación.

Finalmente, a los 28 días de evaluación se observó el mayor desarrollo de brotes en la mayoría de los tratamientos. El tratamiento T5 (1,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó el mayor promedio con 2,76 brotes, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"), seguido de T3 con 2,46 brotes perteneciente al grupo "ab". Por el contrario, los tratamientos T6, T7 y T9 registraron menores promedios de brotación, agrupándose dentro del grupo estadístico "e".

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la interacción entre BAP y GA₃ influyó significativamente sobre la capacidad de brotación de las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L., observándose un incremento progresivo en el número de brotes conforme avanzó el tiempo de cultivo. Asimismo, las concentraciones moderadas de reguladores de crecimiento favorecieron mejores respuestas morfogénicas en comparación con las dosis más elevadas.

4.1.2. Variable de Nudos

El análisis estadístico general mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 6) determinó la existencia de diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados para la variable número de nudos en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. Los valores de significancia obtenidos en las evaluaciones realizadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo fueron menores a 0,001, evidenciando diferencias altamente significativas entre tratamientos.

Tabla 6. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el número de nudos en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. evaluadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo.

	Tratamientos Dosis (BAP + GA3)	Nudos_D7	Grupo (D7)	Nudos_D14	Grupo (D14)	Nudos_21	Grupo (D21)	Nudos_28	Grupo (D28)
T1	0,5 BAP - 0,0 GA3	2,27	a	3,92	ab	5,51	a	6,71	a
T2	0,5 BAP - 0,1 GA3	2,05	a	2,72	d	3,04	cd	3,93	d
T3	0,5 BAP - 0,25 GA3	2,27	a	3,06	cd	3,45	bc	4,28	cd
T4	1,0 BAP - 0,0 GA3	2,22	a	4,86	a	6,30	a	8,67	a
T5	1,0 BAP - 0,1 GA3	2,03	a	3,25	bc	3,76	b	4,80	b
T6	1,0 BAP - 0,25 GA3	1,18	b	2,77	d	3,03	d	4,02	d
T7	2,0 BAP - 0,0 GA3	1,11	b	2,80	d	3,73	b	4,22	cd
T8	2,0 BAP - 0,1 GA3	1,36	b	1,88	e	2,50	d	3,03	e
T9	2,0 BAP - 0,25 GA3	1,28	b	2,73	d	3,63	b	4,50	bc

Nota. Los valores representan el promedio del número de nudos. Letras iguales en una misma columna indican que no existen diferencias significativas entre tratamientos, mientras que letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Durante la evaluación realizada a los 7 días de cultivo, los tratamientos T1 y T3 registraron los mayores promedios con 2,27 nudos, seguidos de T4 con 2,22 nudos, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"). En contraste, los tratamientos T6, T7, T8 y T9 presentaron menores promedios, agrupándose dentro del grupo estadístico "b". Estos resultados evidencian que las concentraciones moderadas de BAP favorecieron una mejor respuesta inicial en la formación de nudos.

A los 14 días de evaluación se observó un incremento progresivo en el número de nudos. El tratamiento T4 presentó el mayor promedio con 4,86 nudos, perteneciendo al grupo estadístico superior ("a"), seguido de T1 con 3,92 nudos ubicado dentro del grupo "ab". En contraste, el tratamiento T8 registró el menor promedio con 1,88 nudos, ubicándose dentro del grupo estadístico "e". Los tratamientos restantes compartieron grupos intermedios de significancia ("bc", "cd" y "d"), evidenciando respuestas variables según las concentraciones de reguladores de crecimiento empleadas.

En la evaluación realizada a los 21 días de cultivo, el tratamiento T4 mantuvo el mayor promedio con 6,30 nudos, seguido de T1 con 5,51 nudos, ambos pertenecientes al grupo estadístico superior ("a"). Los tratamientos T5, T7 y T9 presentaron valores intermedios agrupados dentro de los grupos "b" y "bc". Por el contrario, los

tratamientos T2, T6 y T8 registraron los menores valores promedio, agrupándose dentro de los grupos estadísticos inferiores ("cd" y "d").

Finalmente, a los 28 días de evaluación se observó el mayor desarrollo de nudos en la mayoría de tratamientos. El tratamiento T4 presentó el mayor promedio con 8,67 nudos, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"), seguido de T1 con 6,71 nudos perteneciente igualmente al grupo "a". En contraste, el tratamiento T8 registró el menor promedio con 3,03 nudos, perteneciendo al grupo estadístico "e". Los tratamientos restantes presentaron respuestas intermedias distribuidas entre los grupos "b", "bc", "cd" y "d".

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la interacción entre BAP y GA₃ influyó significativamente sobre la formación de nudos en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L., observándose un incremento progresivo conforme avanzó el tiempo de cultivo. Asimismo, las concentraciones intermedias de BAP favorecieron mejores respuestas morfogénicas en comparación con las dosis más elevadas.

4.1.3. Variable de Longitud

El análisis estadístico general mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 7) determinó la existencia de diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados para la variable longitud en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. Los valores de significancia obtenidos en las evaluaciones realizadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo fueron iguales a 0,001, evidenciando diferencias significativas entre tratamientos durante todas las fechas de evaluación.

Tabla 7. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre la longitud en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. evaluadas a los 7, 14, 21 y 28 días de cultivo.

Tratamientos Dosis (BAP + GA3)	Long_D7	Grupo (D7)	Long_D14	Grupo (D14)	Long_21	Grupo (D21)	Long_28	Grupo (D28)
T1 0,5 BAP - 0,0 GA3	1,77	b	3,35	cd	4,83	bc	5,59	a
T2 0,5 BAP - 0,1 GA3	2,58	a	3,64	bc	4,22	de	4,66	bc
T3 0,5 BAP - 0,25 GA3	2,81	a	4,55	a	5,44	a	5,87	a
T4 1,0 BAP - 0,0 GA3	1,57	bc	2,96	de	4,38	cd	5,47	a
T5 1,0 BAP - 0,1 GA3	2,35	a	3,88	b	4,50	bcd	4,88	b
T6 1,0 BAP - 0,25 GA3	1,37	c	2,72	e	3,67	Fg	4,20	cd
T7 2,0 BAP - 0,0 GA3	0,60	d	1,83	f	2,86	g	3,42	d
T8 2,0 BAP - 0,1 GA3	1,59	bc	3,86	b	4,98	ab	5,72	a
T9 2,0 BAP - 0,25 GA3	1,63	bc	2,69	e	3,86	ef	4,53	bc

Nota. Los valores representan el promedio de longitud. Letras iguales en una misma columna indican que no existen diferencias significativas entre tratamientos, mientras que letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Durante la evaluación realizada a los 7 días de cultivo, el tratamiento T3 presentó el mayor promedio de longitud con 2,81, seguido de T2 con 2,58 y T5 con 2,35, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"). En contraste, el tratamiento T7 registró el menor promedio con 0,60, perteneciendo al grupo estadístico "d". Los tratamientos restantes presentaron respuestas intermedias distribuidas entre los grupos "b", "bc" y "c".

A los 14 días de evaluación se observó un incremento progresivo en la longitud de las vitroplantas. El tratamiento T3 mantuvo el mayor promedio con 4,55, perteneciendo al grupo estadístico superior ("a"), seguido de T5 y T8, cuyos valores se ubicaron dentro del grupo "b". Por el contrario, el tratamiento T7 presentó el menor promedio con 1,83, agrupándose dentro del grupo estadístico "f".

En la evaluación realizada a los 21 días de cultivo, el tratamiento T3 continuó registrando el mayor promedio de longitud con 5,44, perteneciendo al grupo estadístico superior ("a"), seguido de T8 con 4,98 ubicado en el grupo "ab". En contraste, el tratamiento T7 presentó nuevamente el menor promedio con 2,86, perteneciendo al grupo estadístico "g". Los tratamientos restantes mostraron valores intermedios agrupados en los grupos "bc", "cd", "de", "ef" y "fg".

Finalmente, a los 28 días de evaluación se observó el mayor desarrollo longitudinal en la mayoría de los tratamientos. El tratamiento T3 presentó el mayor promedio con 5,87, seguido de T8 con 5,72, T1 con 5,59 y T4 con 5,47, todos pertenecientes al grupo estadístico superior ("a"). Por el contrario, el tratamiento T7 registró el menor promedio con 3,42, ubicándose dentro del grupo estadístico "d".

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la interacción entre BAP y GA₃ influyó significativamente sobre el crecimiento longitudinal de las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. durante el periodo de evaluación. Asimismo, las concentraciones intermedias de reguladores de crecimiento favorecieron una mayor elongación, mientras que las dosis más elevadas tendieron a reducir el crecimiento de las vitroplantas.

4.1.4. Variables de diámetro de tallo

El análisis estadístico general mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 8) determinó la existencia de diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados para la variable diámetro de tallo en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. El valor de significancia obtenido fue menor a 0,001, evidenciando diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Tabla 8. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el diámetro de tallo en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. evaluadas a los 28 días de cultivo.

Tratamientos	Dosis (BAP + GA3)	D28_Diámetro del tallo	Grupo (D28)
T1	0,5 BAP - 0,0 GA3	0,54	a
T2	0,5 BAP - 0,1 GA3	0,42	c
T3	0,5 BAP - 0,25 GA3	0,50	b
T4	1,0 BAP - 0,0 GA3	0,53	ab
T5	1,0 BAP - 0,1 GA3	0,50	b
T6	1,0 BAP - 0,25 GA3	0,32	d
T7	2,0 BAP - 0,0 GA3	0,32	d
T8	2,0 BAP - 0,1 GA3	0,41	c
T9	2,0 BAP - 0,25 GA3	0,41	c

Nota. Los valores representan el promedio del diámetro de tallo. Letras iguales en una misma columna indican que no existen diferencias significativas entre tratamientos, mientras que letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias significativas en el diámetro de tallo entre los tratamientos evaluados. El tratamiento T1 (0,5 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) presentó el mayor promedio con 0,54, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"), seguido de T4 con 0,53 perteneciente al grupo "ab". Estos resultados

indican que concentraciones moderadas de BAP favorecieron un mayor desarrollo del diámetro del tallo en las vitroplantas.

Por otro lado, los tratamientos T3 y T5 registraron valores intermedios con promedios de 0,50, agrupándose dentro del grupo estadístico "b". Asimismo, los tratamientos T2, T8 y T9 presentaron promedios entre 0,41 y 0,42, perteneciendo al grupo "c", evidenciando respuestas moderadas en el crecimiento del diámetro del tallo.

En contraste, los tratamientos T6 y T7 registraron los menores promedios con 0,32, ubicándose dentro del grupo estadístico inferior ("d"). Estos resultados sugieren que concentraciones elevadas de BAP, combinadas con determinadas dosis de GA₃, redujeron el desarrollo del diámetro del tallo en comparación con las dosis moderadas.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la interacción entre BAP y GA₃ influyó significativamente sobre el diámetro del tallo en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. Asimismo, las concentraciones moderadas de reguladores de crecimiento favorecieron un mejor desarrollo estructural de las vitroplantas, mientras que las dosis más elevadas limitaron el engrosamiento del tallo.

4.1.5. Variables de Biomasa (Fresca, Seca y Porcentaje de Materia Seca)

El análisis estadístico general mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 9) determinó la existencia de diferencias altamente significativas entre los tratamientos evaluados para las variables biomasa fresca, biomasa seca y porcentaje de materia seca en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. Los valores de significancia obtenidos en la evaluación realizada a los 28 días de cultivo fueron menores a 0,001, evidenciando diferencias altamente significativas entre tratamientos.

Tabla 9. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre la biomasa fresca, biomasa seca y porcentaje de materia seca en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. evaluadas a los 28 días de cultivo.

Tratamientos	Dosis (BAP + GA ₃)	Biomasa Fresca (g)	Grupo (BF)	Biomasa Seca (g)	Grupo (BS)	% Materia Seca	Grupo (%MS)
T1	0,5 BAP - 0,0 GA ₃	0,039	b	0,002	d	6,41	de
T2	0,5 BAP - 0,1 GA ₃	0,027	de	0,001	ef	5,99	ef
T3	0,5 BAP - 0,25 GA ₃	0,050	a	0,003	bc	6,79	cd
T4	1,0 BAP - 0,0 GA ₃	0,046	a	0,003	c	6,98	c
T5	1,0 BAP - 0,1 GA ₃	0,052	a	0,004	b	8,00	b
T6	1,0 BAP - 0,25 GA ₃	0,023	ef	0,001	f	7,16	bc
T7	2,0 BAP - 0,0 GA ₃	0,021	f	0,001	g	5,67	f
T8	2,0 BAP - 0,1 GA ₃	0,033	bc	0,009	a	29,10	a
T9	2,0 BAP - 0,25 GA ₃	0,032	cd	0,001	e	6,14	de

Nota. Los valores representan el promedio de cada variable evaluada. Letras iguales dentro de una misma columna indican que no existen diferencias significativas entre tratamientos, mientras que letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). BF = Biomasa fresca; BS = Biomasa seca; %MS = Porcentaje de materia seca.

En la variable biomasa fresca, se observaron diferencias importantes entre tratamientos. El tratamiento T5 (1,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó el mayor promedio con 0,052 g, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"). De manera similar, los tratamientos T3 y T4 registraron valores elevados de 0,050 g y 0,046 g, respectivamente, evidenciando una mayor acumulación de tejido fresco en comparación con los demás tratamientos. Por el contrario, los tratamientos T6 y T7 presentaron los menores valores de biomasa fresca con 0,023 g y 0,021 g, ubicándose en los grupos inferiores de significancia estadística.

Para la variable biomasa seca, el tratamiento T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) alcanzó el mayor promedio con 0,009 g, perteneciendo al grupo estadístico superior ("a"), lo que indica una mayor acumulación de materia sólida en los tejidos vegetales. El tratamiento T5 ocupó el segundo rango de importancia con 0,004 g, mientras que los tratamientos T2, T6, T7 y T9 registraron los menores valores con 0,001 g, reflejando una menor eficiencia en la acumulación de biomasa seca.

En cuanto al porcentaje de materia seca, el tratamiento T8 presentó el valor más alto con 29,10 %, diferenciándose estadísticamente del resto de tratamientos y ubicándose en el grupo superior ("a"). Este comportamiento indica una mayor proporción de sólidos acumulados en relación con el contenido de agua de los tejidos. En contraste, los tratamientos T7 y T2 registraron los menores porcentajes de materia seca con 5,67 % y 5,99 %, respectivamente, ubicándose en los grupos inferiores de significancia.

En términos generales, los resultados evidencian que la interacción entre BAP y GA₃ influyó significativamente sobre la acumulación de biomasa y el contenido de materia seca en las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. Los tratamientos con concentraciones intermedias de reguladores de crecimiento favorecieron una mejor respuesta fisiológica y morfogénica, reflejada en una mayor producción de biomasa fresca, biomasa seca y porcentaje de materia seca.

4.1.6. Variable de índice de calidad

El análisis estadístico general mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 10) determinó la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados para la variable índice de calidad de las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. a los 28 días de cultivo ($p < 0,05$). Los resultados evidenciaron variaciones en la respuesta morfofisiológica de las vitroplantas en función de las concentraciones de BAP y GA₃ utilizadas en el medio de cultivo.

Tabla 10. Efecto de los reguladores de crecimiento sobre el índice de calidad en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. evaluadas a los 28 días de cultivo.

Tratamientos	Dosis (BAP + GA ₃)	Índice de calidad	Grupo (D28)
T1	0,5 BAP - 0,0 GA ₃	4,12	a
T2	0,5 BAP - 0,1 GA ₃	2,37	bc
T3	0,5 BAP - 0,25 GA ₃	2,42	b
T4	1,0 BAP - 0,0 GA ₃	4,08	a
T5	1,0 BAP - 0,1 GA ₃	1,78	c
T6	1,0 BAP - 0,25 GA ₃	3,55	a
T7	2,0 BAP - 0,0 GA ₃	3,50	a
T8	2,0 BAP - 0,1 GA ₃	3,26	a
T9	2,0 BAP - 0,25 GA ₃	3,41	a

Nota. Los valores representan el promedio del índice de calidad. Letras iguales dentro de la misma columna indican que no existen diferencias significativas entre tratamientos, mientras que letras diferentes indican diferencias estadísticas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

El tratamiento T1 (0,5 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) presentó el mayor índice de calidad con un valor promedio de 4,12, ubicándose dentro del grupo estadístico superior ("a"). De manera similar, el tratamiento T4 (1,0 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) alcanzó un valor de 4,08, compartiendo el mismo grupo estadístico y evidenciando un comportamiento favorable en el desarrollo integral de las vitroplantas.

Los tratamientos T6, T7, T8 y T9 también se ubicaron dentro del grupo estadístico "a", presentando valores intermedios entre 3,26 y 3,55, lo que refleja respuestas morfológicas aceptables y un adecuado equilibrio entre crecimiento y acumulación

de biomasa. Estos resultados sugieren que concentraciones moderadas y altas de BAP, combinadas con bajas dosis de GA₃, favorecieron el vigor de las vitroplantas.

Por otro lado, el tratamiento T5 (1,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) registró el menor índice de calidad con un promedio de 1,78, perteneciendo al grupo estadístico inferior ("c"), indicando un menor desempeño fisiológico y morfológico en comparación con los demás tratamientos. Asimismo, los tratamientos T2 y T3 presentaron valores intermedios de 2,37 y 2,42, agrupándose en las categorías "bc" y "b", respectivamente.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la interacción entre BAP y GA₃ influyó significativamente sobre el índice de calidad de las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L., observándose mejores respuestas en tratamientos con ausencia o bajas concentraciones de GA₃. Esto permitió obtener vitroplantas con mayor vigor y mejor equilibrio entre crecimiento, biomasa y desarrollo estructural.

4.1.7. Índice de Vigor Morfológico (IVM)

El análisis estadístico no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 11) determinó la existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos evaluados para el índice de Vigor Morfológico a los 28 días. Para establecer las diferencias jerárquicas, se aplicó una prueba de comparaciones múltiples con ajuste de Bonferroni (Ver Tabla 11 y Figura 8).

Tabla 11. Efecto de los tratamientos sobre el Índice de Vigor Morfológico en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. a los 28 días de cultivo.

Tratamiento	Dosis (BAP + GA ₃)	Mediana (IVM)*	Plantas "Elite" (Nota 3) **	Grupo de Significancia
T1	0,5 BAP - 0,0 GA ₃	2	3	b
T2	0,5 BAP - 0,1 GA ₃	2	1	c
T3	0,5 BAP - 0,25 GA ₃	2	2	bc
T4	1,0 BAP - 0,0 GA ₃	2	1	b
T5	1,0 BAP - 0,1 GA ₃	2	1	b
T6	1,0 BAP - 0,25 GA ₃	2	0	bc
T7	2,0 BAP - 0,0 GA ₃	2	3	b
T8	2,0 BAP - 0,1 GA ₃	3	65	a
T9	2,0 BAP - 0,25 GA ₃	2	1	b

Nota. La Mediana representa la tendencia central en una escala cualitativa ordinal (1 = Deficiente, 2 = Regular, 3 = Vigoroso). Plantas "Vigorosas" contabiliza el número absoluto de explantes (de un total de $n = 80$ por tratamiento) que alcanzaron la máxima calificación morfológica. Letras diferentes en la columna de grupo indican diferencias estadísticas significativas según la prueba de comparaciones múltiples con ajuste de Bonferroni posterior a Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Distribución del Índice de Vigor Morfológico

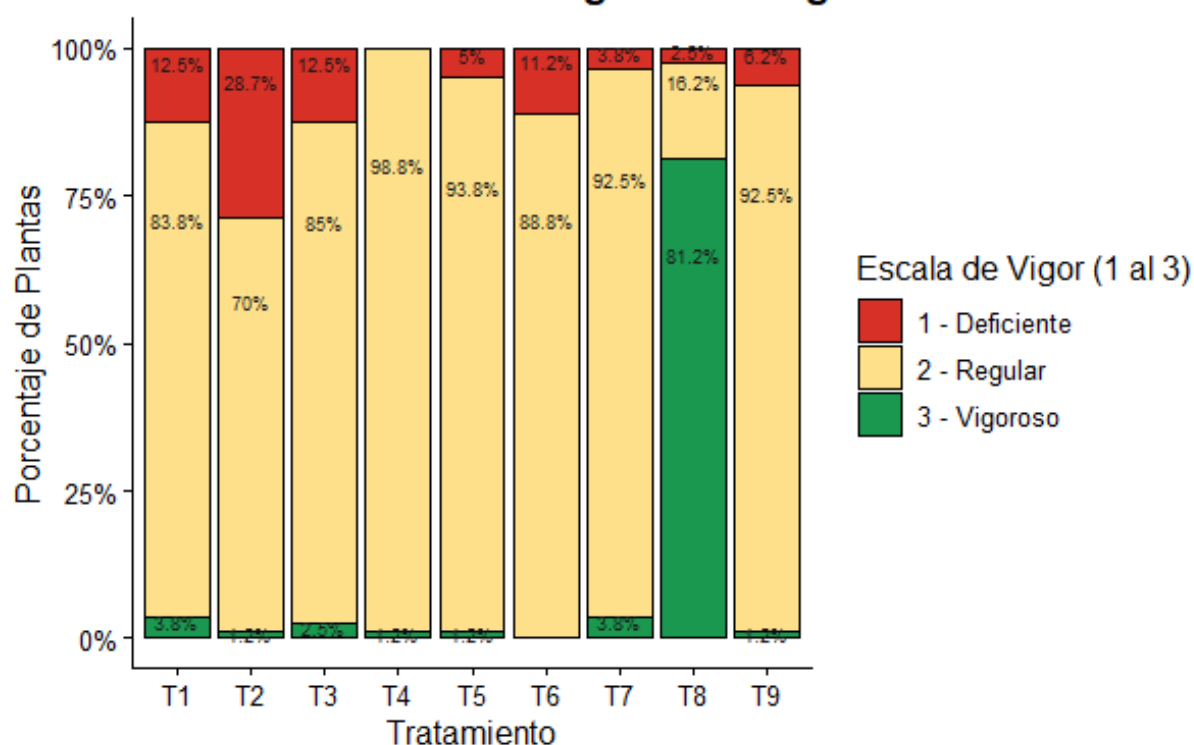


Figura 8. Distribución porcentual del Índice de Vigor Morfológico (IVM) por tratamiento a los 28 días

Análisis de los Resultados:

La evaluación ordinal del vigor evidenció una superioridad absoluta y marcadamente significativa del tratamiento T8. Este fue el único tratamiento en registrar una Mediana de 3 ('Vigoroso'), posicionándose en solitario en el estrato estadístico superior (grupo 'a'). De manera sobresaliente, el T8 logró que 65 de sus 80 plántulas (81,25%) alcanzaran la calificación vigorosa.

Por el contrario, el resto de los medios evaluados promovieron un vigor predominantemente 'Regular' (Mediana de 2). Dentro de este bloque inferior, el tratamiento T2 se segregó como el de menor desempeño estadístico global (grupo 'c'), seguido por el T6 (grupo 'bc'), el cual no logró inducir ninguna plántula con la máxima calificación visual.

Los resultados sugieren que las concentraciones hormonales empleadas en el tratamiento T8 favorecieron un equilibrio fisiológico adecuado para el desarrollo vigoroso de las vitroplantas, promoviendo características morfológicas superiores y una mayor uniformidad visual durante el cultivo *in vitro*.

4.1.8. Incidencia de Hiperhidricidad

El análisis estadístico mediante regresión logística (GLM Binomial) (Tabla 12) determinó la existencia de diferencias significativas (Altamente Significativo, $p < 0,001$) entre los distintos tratamientos evaluados para la variable de hiperhidricidad a los 28 días. En general, la incidencia de este trastorno fisiológico presentó variaciones importantes entre tratamientos (Ver Tabla 12 y Figura 9).

Tabla 12. Frecuencia y porcentaje de hiperhidricidad en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. bajo diferentes tratamientos a los 28 días.

Tratamientos	Dosis (BAP + GA3)	Explantos Evaluados	Casos Hiperhídricos	Incidencia (%)	Grupo
T1	0,5 BAP - 0,0 GA3	80	12	15,00 %	b
T2	0,5 BAP - 0,1 GA3	80	17	21,25 %	c
T3	0,5 BAP - 0,25 GA3	80	57	71,25 %	d
T4	1,0 BAP - 0,0 GA3	80	0	0,00 %	a
T5	1,0 BAP - 0,1 GA3	80	57	71,25 %	d
T6	1,0 BAP - 0,25 GA3	80	6	7,50 %	ab
T7	2,0 BAP - 0,0 GA3	80	5	6,25 %	ab
T8	2,0 BAP - 0,1 GA3	80	0	0,00 %	a
T9	2,0 BAP - 0,25 GA3	80	11	13,75 %	b

Nota. Letras iguales en la columna de grupo indican que no existen diferencias estadísticas significativas según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p > 0,05$). La incidencia (%) representa el porcentaje de explantes que presentaron hiperhidricidad respecto al total de explantes evaluados ($n = 80$ por tratamiento).

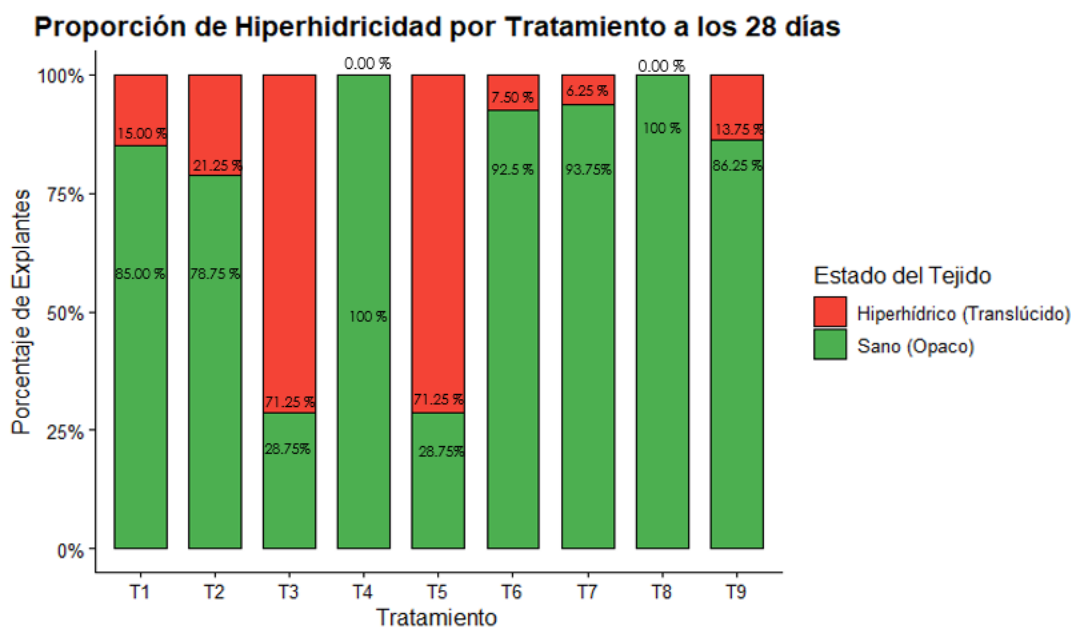


Figura 9. Proporción de hiperhidricidad por tratamiento a los 28 días de cultivo

Análisis de los Resultados:

Los tratamientos T4 (1,0-0,0 MS) y T8 (2,0-0,1 MS) registraron la menor incidencia de hiperhidricidad, con valores de 0,00 %, ubicándose dentro del grupo estadístico "a", lo que indica el mejor comportamiento fisiológico de las vitroplantas frente a esta alteración. De manera similar, los tratamientos T7 (2,0-0,0 MS) y T6 (1,0-0,25 MS) presentaron porcentajes bajos de hiperhidricidad, con 6,25 % y 7,50 %, respectivamente, agrupándose en la categoría "ab", mostrando también una respuesta favorable.

En contraste, los tratamientos T3 (0,5-0,25 MS) y T5 (1,0-0,1 MS) alcanzaron los mayores porcentajes de incidencia, con 71,25 % en ambos casos, ubicándose en el grupo estadístico "d", evidenciando una elevada susceptibilidad a la hiperhidricidad. Asimismo, el tratamiento T2 presentó una incidencia intermedia de 21,25 %, correspondiente al grupo "c".

Los tratamientos T1 y T9 mostraron incidencias de 15,00 % y 13,75 %, respectivamente, agrupándose dentro de la categoría "b", indicando un comportamiento moderado frente a este desorden fisiológico.

Desde el punto de vista fisiológico, la hiperhidricidad observada podría estar asociada a alteraciones en el equilibrio osmótico y en la absorción de agua dentro del sistema *in vitro*. Los tratamientos que presentaron menores porcentajes de incidencia reflejan condiciones más adecuadas para el desarrollo estructural de las micro plántulas, mientras que concentraciones específicas de reguladores de crecimiento favorecieron la aparición de tejidos translúcidos y con exceso de hidratación, afectando negativamente la calidad morfológica de los explantes.

4.1.9. Incidencia de Callogénesis

El análisis estadístico mediante regresión logística (GLM Binomial) (Tabla 13) determinó la existencia de diferencias significativas (Altamente Significativo, $p < 0,001$) entre los tratamientos evaluados respecto a la formación de callo en los explantes a los 28 días. Para establecer las diferencias jerárquicas entre tratamientos, se aplicó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey (Ver Tabla 13 y Figura 10).

Tabla 13. Frecuencia y porcentaje de callogénesis en vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. bajo diferentes medios de cultivo a los 28 días.

Tratamiento	Dosis (BAP + GA3)	Explantos Evaluados	Casos con Callo	Incidencia (%)	Grupo
T1	0,5 BAP - 0,0 GA3	80	0	0,00 %	a
T2	0,5 BAP - 0,1 GA3	80	15	18,75 %	bc
T3	0,5 BAP - 0,25 GA3	80	65	81,25 %	d
T4	1,0 BAP - 0,0 GA3	80	15	18,75 %	bc
T5	1,0 BAP - 0,1 GA3	80	64	80,00 %	d
T6	1,0 BAP - 0,25 GA3	80	19	23,75 %	c
T7	2,0 BAP - 0,0 GA3	80	13	16,25 %	bc
T8	2,0 BAP - 0,1 GA3	80	4	5,00 %	ab
T9	2,0 BAP - 0,25 GA3	80	12	15,00 %	b

Nota. La incidencia (%) representa el porcentaje de explantes que presentaron formación de callo a los 28 días de cultivo, calculado en relación con el total de explantes evaluados por tratamiento (n = 80). Letras diferentes en la columna de grupo indican diferencias estadísticas significativas según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0,05$).

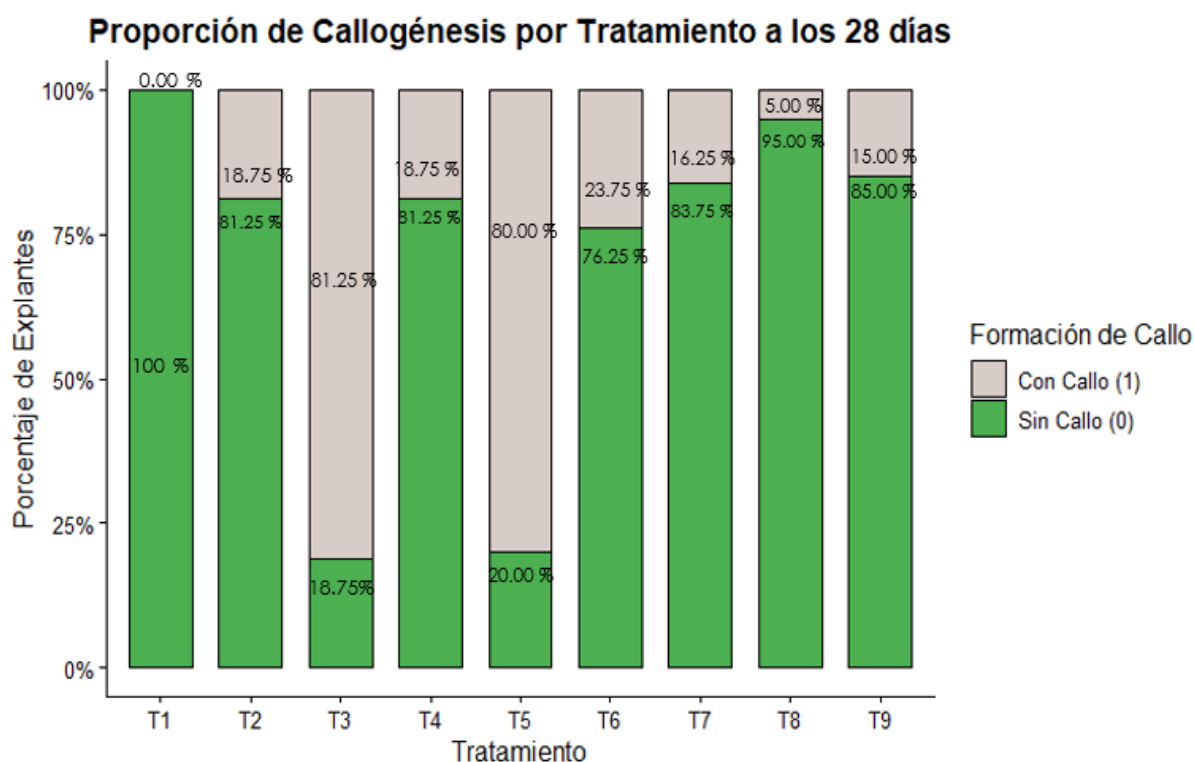


Figura 10. Proporción de callogénesis por tratamiento a los 28 días de cultivo

Análisis de los Resultados:

Los resultados evidenciaron diferencias significativas en la formación de callo entre los tratamientos evaluados ($p < 0,05$). Los tratamientos T3 (0,5-0,25 MS) y T5 (1,0-0,1 MS) presentaron los mayores porcentajes de callogénesis, con 81,25 % y 80,00 % de explantes con formación de callo, respectivamente, ubicándose estadísticamente

en el grupo "d", lo que indica el comportamiento menos favorable debido a la elevada incidencia de callogénesis.

En contraste, el tratamiento T1 (0,5-0,0 MS) no presentó formación de callo (0,00 %), posicionándose en el grupo "a", considerado el tratamiento más favorable por mantener la integridad morfológica de los explantes. De manera similar, el tratamiento T8 (2,0-0,1 MS) registró únicamente 5,00 % de incidencia de callogénesis, ubicándose en el grupo "ab", reflejando también un comportamiento adecuado para el desarrollo *in vitro*.

Los tratamientos T2, T4, T7 y T9 presentaron incidencias intermedias entre 15,00 % y 18,75 %, agrupándose estadísticamente en "bc", mientras que T6 alcanzó 23,75 % y se ubicó en el grupo "b", indicando una respuesta moderada de formación de callo.

Desde el punto de vista fisiológico, la elevada callogénesis observada en algunos tratamientos puede relacionarse con un desbalance hormonal generado por las concentraciones de reguladores de crecimiento utilizadas en el medio de cultivo. El exceso de formación de callo puede alterar el desarrollo normal de los tejidos y afectar la estabilidad morfológica de las vitroplantas. Por el contrario, los tratamientos con baja incidencia de callogénesis favorecieron un crecimiento más organizado y uniforme, conservando mejor la estructura vegetal durante el cultivo *in vitro*.

4.1.10. Análisis costo - beneficio

La evaluación económica de los tratamientos permitió determinar que el rendimiento financiero estuvo estrechamente relacionado con la calidad morfológica de las plantas obtenidas durante la fase de multiplicación *in vitro*. Aunque para efectos comparativos se estimó un precio de venta de USD 0,50 por planta para los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T9, los resultados biológicos obtenidos evidenciaron que dichas plantas presentaron limitaciones de calidad, entre ellas la formación de callo (callogénesis), menor índice de vigor morfológico, menor número de nudos, menor elongación de brotes y, en algunos tratamientos, respuestas fisiológicas menos favorables.

Estas características reducen significativamente su valor comercial, debido a que un comprador de material vegetal propagado *in vitro* busca plantas uniformes, vigorosas y con alta probabilidad de supervivencia durante la aclimatación y posterior establecimiento en campo. En consecuencia, aun cuando se consideró un precio hipotético de USD 0,50 por planta para realizar el análisis económico, desde

un punto de vista técnico y comercial la venta de este material resulta poco viable, ya que no garantiza un adecuado prendimiento ni un desarrollo agronómico satisfactorio.

Los resultados económicos de la tabla 14 respaldan esta interpretación. Todos los tratamientos mencionados presentaron relaciones beneficio/costos inferiores a la unidad (0,70–0,99), indicando que por cada dólar invertido no se recupera totalmente la inversión realizada. Asimismo, la rentabilidad o beneficio directo fue negativa, con valores comprendidos entre -0,01 y -0,30, evidenciando pérdidas económicas bajo las condiciones evaluadas. Aunque el tratamiento T5 presentó la relación beneficio/costo más cercano al punto de equilibrio (0,99), su rentabilidad continuó siendo negativa (-0,01), por lo que tampoco representa una alternativa económicamente viable para la producción comercial de vitroplantas.

En contraste, el tratamiento T8 (2,0 mg/L de BAP + 0,1 mg/L de GA₃) alcanzó el 100 % de prendimiento de los explantes, generó 1000 plantas comercializables y obtuvo los mejores indicadores morfológicos durante la evaluación experimental, caracterizados por mayor vigor, mejor elongación de brotes, mayor número de nudos y ausencia de alteraciones que limitaran su calidad comercial. Debido a estas características superiores, se estableció un precio de venta diferenciado de USD 0,62 por planta, valor sustentado en la mayor calidad del material vegetal obtenido.

Como resultado, el tratamiento T8 registró un ingreso de USD 620,00 frente a un costo de producción de USD 464,70, alcanzando una relación beneficio/costo de 1,33 y una rentabilidad positiva de 0,33. Esto significa que por cada dólar invertido se obtuvo un retorno de USD 1,33, equivalente a un beneficio neto de USD 0,33 por dólar invertido, constituyéndose en el único tratamiento económicamente rentable para la producción de plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.

Tabla 14. Análisis costo-beneficio de los tratamientos evaluados para la producción de plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.

Trat.	Expl.	P. (%)	Pl. venta	P. venta	I. venta	C. trat.	U.neta	B/C	B.directo
T1	1000	85,00	850	0,50 \$	425 \$	460,95 \$	-35,95	0,92	-0,08
T2	1000	86,70	867	0,50 \$	433,5 \$	461,20 \$	-27,70	0,94	-0,06
T3	1000	73,30	733	0,50 \$	366,5 \$	461,4475 \$	-94,95	0,79	-0,21
T4	1000	80,00	800	0,50 \$	400 \$	462,20 \$	-62,20	0,87	-0,13
T5	1000	91,70	917	0,50\$	458,5 \$	462,4475 \$	-3,95	0,99	-0,01
T6	1000	73,30	733	0,50\$	366,5 \$	462,70 \$	-96,20	0,79	-0,21
T7	1000	65,00	650	0,50\$	325 \$	464,45 \$	-139,45	0,70	-0,30
T8	1000	100,00	1000	0,62\$	620 \$	464,70 \$	155,30	1,33	0,33
T9	1000	73,30	733	0,50\$	366,5 \$	464,95\$	-98,45	0,79	-0,21

4.2. DISCUSIÓN

4.2.1. Discusión de la variable número de brotes

La capacidad de brotación de las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola estuvo influenciada significativamente por las concentraciones de BAP y GA₃ utilizadas en el medio de cultivo. El tratamiento T5 (1,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó el mayor promedio a los 28 días con 2,76 brotes, seguido de T3 (0,5 mg/L BAP + 0,25 mg/L GA₃) con 2,46 brotes, mientras que T7 (2,0 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) registró los menores valores con 1,13 brotes.

Con estos resultados se evidencian que las concentraciones intermedias de BAP combinadas con bajas dosis de GA₃ favorecieron la multiplicación de brotes y la activación de yemas axilares. Las cuales se relacionaron con los resultados similares que fueron reportados por Silva-Agurto *et al.* (2024), quienes señalaron que concentraciones equilibradas de citoquininas incrementan significativamente el número de brotes y el desarrollo vegetativo en papa cultivada *in vitro*.

Asimismo, Sangacha (2026) reportó que la aplicación de BAP en dosis moderadas favoreció la proliferación de brotes y el desarrollo morfogénico de vitroplantas de papa.

En concordancia con estos hallazgos, investigaciones recientes sobre la multiplicación de *Solanum tuberosum* a partir de yemas confirman que la eficiencia morfogénica alcanza su pico óptimo cuando la dosificación moderada/alta de citoquininas se equilibra con concentraciones bajas de GA₃, de forma similar al tratamiento T8 del presente estudio, y destacan además la importancia de modular simultáneamente la concentración de sacarosa basal del medio de cultivo para

consolidar el vigor de las vitroplantas frente a la posterior fase de aclimatación (Chukwuka *et al.*, 2025; Biopro, 2024).

Desde el punto de vista fisiológico el BAP estimula la división celular y rompe la dominancia apical favoreciendo así la formación de nuevos brotes. Sin embargo, concentraciones elevadas de BAP como en tratamiento T7 se redujeron significativamente la brotación posiblemente debido a desbalances hormonales y estrés fisiológico.

En términos generales los resultados evidencian que el tratamiento T5 representó la combinación hormonal más eficiente para promover la multiplicación de brotes y el desarrollo morfogénico de las vitroplantas.

4.2.2. Discusión de la variable número de nudos

La formación de nudos en las vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola estuvo significativamente influenciada por el equilibrio hormonal entre BAP y GA₃. El tratamiento T4 (1,0 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) presentó los mayores promedios durante el periodo de evaluación, alcanzando 8,67 nudos a los 28 días, seguido de T1 (0,5 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) con 6,71 nudos. En contraste, T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó el menor promedio con 3,03 nudos.

Estos resultados indican que las concentraciones intermedias de BAP favorecieron una mayor diferenciación nodal y desarrollo vegetativo. Silva-Agurto *et al.* (2024) reportaron que el equilibrio hormonal influye significativamente sobre el número de nudos y el desarrollo de vitroplantas de papa.

De igual manera, Stupko y Lugovtsova (2023) señalaron que el ácido giberélico favorece el incremento del número de entrenudos y crecimiento vegetativo cuando se utiliza en concentraciones adecuadas.

Desde el punto de vista fisiológico, el BAP favorece la división celular y diferenciación de tejidos meristemáticos, promoviendo la formación de nudos. Sin embargo, concentraciones elevadas de BAP combinadas con GA₃ redujeron la capacidad de diferenciación nodal.

En términos generales, el tratamiento T4 representó la combinación más eficiente para maximizar la formación de nudos y el potencial de propagación clonal.

4.2.3. Discusión de la variable longitud de la vitroplanta

La longitud de las vitroplantas estuvo significativamente influenciada por la interacción entre BAP y GA₃. El tratamiento T3 (0,5 mg/L BAP + 0,25 mg/L GA₃) presentó el mayor crecimiento longitudinal durante el periodo experimental, alcanzando 5,87 cm a los 28 días, seguido de T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) con 5,72 cm. Por el contrario, T7 (2,0 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) registró el menor crecimiento con 3,42 cm.

Estos resultados evidencian que las bajas concentraciones de BAP combinadas con dosis moderadas de GA₃ favorecieron significativamente la elongación celular. Por otro lado, Ventocilla Sánchez (2024) observó que tratamientos con AG₃ promovieron mayor altura y crecimiento vegetativo en vitroplantas de papa.

Asimismo, Shah *et al.* (2021) reportaron que dosis bajas de GA₃ favorecen el crecimiento vegetativo y elongación de explantes de papa cultivados *in vitro*.

Desde el punto de vista fisiológico el GA₃ promueve la elongación celular y expansión de entrenudos; sin embargo, concentraciones elevadas de BAP limitaron el crecimiento longitudinal al favorecer tejidos más compactos.

En términos generales el tratamiento T3 representó la combinación hormonal más eficiente para promover el crecimiento longitudinal de las vitroplantas.

4.2.4. Discusión de la variable diámetro de tallo

El diámetro del tallo estuvo significativamente influenciado por las concentraciones hormonales utilizadas. Los tratamientos T1 (0,5 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) y T4 (1,0 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) presentaron los mayores promedios con 0,54 mm y 0,53 mm, respectivamente. En contraste el tratamiento T6 (1,0 mg/L BAP + 0,25 mg/L GA₃) y T7 (2,0 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) registraron los menores valores con 0,32 mm.

Estos resultados sugieren que las concentraciones moderadas de BAP favorecieron el fortalecimiento estructural y compactación de tejidos. Silva-Agurto *et al.* (2024) señalaron que concentraciones equilibradas de fitohormonas mejoran el desarrollo morfofisiológico de las vitroplantas.

Además, Ventocilla Sánchez (2024) reportó que el uso adecuado de reguladores de crecimiento favorece la obtención de vitroplantas vigorosas y estructuralmente más estables.

Desde el punto de vista fisiológico, el BAP favorece la división celular y diferenciación de tejidos conductores; sin embargo, concentraciones elevadas de BAP o GA₃ promovieron tallos más delgados y menos compactos.

En términos generales los tratamientos T1 y T4 fueron las combinaciones más eficientes para promover mayor robustez estructural.

4.2.5. Discusión de las variables biomasa fresca, biomasa seca y porcentaje de materia seca

La acumulación de biomasa estuvo significativamente influenciada por las concentraciones de BAP y GA₃. El tratamiento T5 (1,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó la mayor biomasa fresca con 0,052 g, seguido de T3 con 0,050 g. Por otro lado, T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) registró la mayor biomasa seca con 0,009 g y el mayor porcentaje de materia seca con 29,10 %.

Estos resultados indican que las concentraciones hormonales equilibradas favorecieron la acumulación de biomasa y estabilidad fisiológica de los tejidos. Silva-Agurto *et al.* (2024) señalaron que el equilibrio hormonal mejora el desarrollo morfofisiológico de las vitroplantas.

Asimismo, Pineda-Lazaro *et al.* (2021) indicaron que las concentraciones de BAP y AG₃ influyen directamente sobre el crecimiento y desarrollo vegetativo de explantes de papa.

Desde el punto de vista fisiológico, la biomasa fresca refleja expansión celular y acumulación de agua, mientras que la biomasa seca representa acumulación de compuestos estructurales y reservas metabólicas.

El tratamiento T5 favoreció mayor biomasa fresca, mientras que el tratamiento T8 promovió mayor biomasa seca y porcentaje de materia seca.

4.2.6. Discusión de la variable índice de calidad

El índice de calidad evidenció diferencias significativas entre tratamientos. El tratamiento T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó la mejor respuesta, siendo el único tratamiento con mediana de 3 ("Vigoroso") y 65 vitroplantas vigorosas (81,25 %). En contraste, T2 (0,5 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó menor desempeño fisiológico.

Estos resultados indican que la combinación hormonal de T8 favoreció un adecuado equilibrio entre crecimiento, biomasa y estabilidad estructural. Ventocilla Sánchez (2024) observó que tratamientos con AG₃ promovieron vitroplantas más vigorosas.

Asimismo, Silva-Agurto *et al.* (2024) señalaron que el equilibrio hormonal constituye un factor determinante para obtener material vegetal con mejores características morfofisiológicas.

El tratamiento T8 representó la combinación hormonal más eficiente para promover vitroplantas vigorosas y fisiológicamente estables.

4.2.7. Discusión del Índice de Vigor Morfológico (IVM)

El Índice de Vigor Morfológico presentó diferencias significativas entre tratamientos, evidenciando que el equilibrio hormonal influyó sobre la calidad visual y fisiológica de las vitroplantas. El tratamiento T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) presentó la mejor respuesta alcanzando una mediana de 3 ("Vigoroso") y un 81,25 % de vitroplantas vigorosas, mientras que T2 (0,5 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) registró el menor desempeño.

Estos resultados indican que la combinación de BAP y bajas dosis de GA₃ favoreció simultáneamente elongación, acumulación de biomasa y estabilidad estructural. Silva-Agurto *et al.* (2024) señalaron que el equilibrio hormonal mejora las características morfofisiológicas durante la multiplicación *in vitro*. Asimismo, Ventocilla Sánchez (2024) reportó que tratamientos con AG₃ favorecen el vigor vegetativo de las vitroplantas.

Fisiológicamente, el elevado vigor observado en T8 refleja una adecuada organización tisular y balance metabólico. Bajo las condiciones del estudio el tratamiento T8 fue el tratamiento más eficiente para promover vitroplantas vigorosas y uniformes.

4.2.8. Discusión de la incidencia de hiperhidricidad

La incidencia de hiperhidricidad presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos, demostrando que las concentraciones hormonales influyeron sobre la estabilidad fisiológica de las vitroplantas. Los tratamientos T4 (1,0 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) y T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) no presentaron hiperhidricidad (0 %), mientras que T3 (0,5 mg/L BAP + 0,25 mg/L GA₃) y T5 (1,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) registraron la mayor incidencia con 71,25 %.

Estos resultados sugieren que las combinaciones hormonales equilibradas permitieron mantener una adecuada organización celular y menor acumulación excesiva de agua. Ali *et al.* (2022) reportaron que tratamientos con reguladores de crecimiento pueden inducir callogénesis y alteraciones fisiológicas en vitroplantas de papa. Asimismo, Silva-Agurto *et al.* (2024) indicaron que el equilibrio hormonal es determinante para mantener estabilidad morfofisiológica durante la multiplicación *in vitro*.

Desde el punto de vista fisiológico la hiperhidricidad se relaciona con alteraciones en la absorción de agua y deficiente organización tisular. Bajo las condiciones del estudio, T4 y T8 fueron los tratamientos más eficientes para reducir este desorden fisiológico.

Fisiológicamente, la excesiva vitrificación observada en los tratamientos T3 y T5 responde a un estrés oxidativo severo originado por la descompensación en el metabolismo del nitrógeno y un incremento en la biosíntesis de etileno (Husen *et al.*, 2024). Cuando la dosis de BAP satura los receptores celulares sin la correcta compensación antagónica de GA₃, se altera la permeabilidad de la membrana celular y la lignificación del xilema falla, obligando al explante a acumular tejidos traslúcidos inundados de agua intercelular.

4.2.9. Discusión de la incidencia de callogénesis

La callogénesis presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos (Altamente Significativo, $p < 0,001$), evidenciando que la interacción entre BAP y GA₃ influyó sobre la formación de tejidos callosos.

El tratamiento T1 (0,5 mg/L BAP + 0,0 mg/L GA₃) no presentó formación de callo (0,00 %), mientras que T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) registró únicamente 5,00 %. Por el contrario, el tratamiento T3 (0,5 mg/L BAP + 0,25 mg/L GA₃) y T5 (1,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) alcanzaron incidencias de 81,25 % y 80,00 %, respectivamente.

Estos resultados sugieren que las combinaciones hormonales equilibradas favorecieron un crecimiento organizado y redujeron la proliferación desordenada de tejidos. Ali *et al.* (2022) reportaron que tratamientos con reguladores de crecimiento pueden inducir callogénesis y alteraciones morfológicas en vitroplantas de papa. Desde el punto de vista fisiológico, la callogénesis se relaciona con procesos excesivos de división celular sin adecuada diferenciación tisular. Bajo las condiciones

del estudio los tratamientos T1 y T8 fueron los tratamientos más eficientes para minimizar la formación de callo y mantener estabilidad morfológica.

De manera similar, la callogénesis excesiva registrada en T3 y T5 puede explicarse por la saturación de receptores celulares de BAP sin la compensación antagónica adecuada de GA₃, lo que favorece un estrés oxidativo que desencadena una división celular descontrolada sin la diferenciación tisular correspondiente, obligando al explante a generar masas de células indiferenciadas (callo) en lugar de tejido organogénico (Husen *et al.*, 2024).

4.2.10. Discusión de rentabilidad

El análisis costo/beneficio permitió determinar que el tratamiento T8 (2,0 mg/L de BAP + 0,1 mg/L de GA₃) fue el único que presentó viabilidad económica, al registrar una relación beneficio/costo de 1,33 y una rentabilidad positiva de 0,33. En contraste, los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T9 obtuvieron relaciones beneficio/costo inferiores a la unidad y beneficios directos negativos, evidenciando que, bajo las condiciones del estudio, la inversión realizada no sería recuperada.

Para fines comparativos, en el análisis económico se estimó un precio referencial de USD 0,50 por planta para los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T9. Sin embargo, este valor corresponde únicamente a un supuesto para evaluar la rentabilidad de los tratamientos, ya que el material vegetal obtenido presentó características morfológicas que limitan su potencial de comercialización, entre ellas la formación de callo, menor índice de vigor morfológico y un desarrollo vegetativo inferior respecto al tratamiento T8. Estas características pueden comprometer el desempeño de las vitroplantas durante las etapas de aclimatación y establecimiento en campo, reduciendo su valor comercial.

Por el contrario, el tratamiento T8 produjo plantas con mayor vigor morfológico, mejor desarrollo vegetativo y ausencia de alteraciones que afectaran su calidad, además de alcanzar el 100 % de prendimiento de los explantes. En función de estas características, se estimó un precio de venta de USD 0,62 por planta, considerando que el material vegetal obtenido ofrece mejores condiciones de calidad para su propagación y establecimiento.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Bandyopadhyay *et al.* (2025), quienes desarrollaron un protocolo de micropropagación de *Solanum tuberosum* y concluyeron que la obtención de vitroplantas vigorosas, con adecuado

desarrollo morfológico, alta supervivencia durante la aclimatación y estabilidad genética constituye un requisito fundamental para su utilización en programas de propagación y comercialización. En este sentido, la calidad del material vegetal representa un criterio determinante para incrementar su valor comercial y garantizar un adecuado establecimiento en campo, aspecto que coincide con el comportamiento observado en el tratamiento T8.

En consecuencia, los resultados demuestran que la rentabilidad de un protocolo de micropropagación no depende exclusivamente del número de vitroplantas obtenidas, sino principalmente de la calidad morfológica y fisiológica del material vegetal producido, ya que estas características determinan su viabilidad comercial y su potencial de establecimiento en condiciones de campo.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La interacción entre las diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido giberélico (GA_3) influyó significativamente sobre la tasa de multiplicación de los segmentos nodales de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola. El máximo rendimiento en la tasa de multiplicación se alcanza mediante el balance provisto por el tratamiento T8 (2,0 mg/L de BAP + 0,1 mg/L de GA_3), el cual promueve una brotación vigorosa y uniforme. Si bien el tratamiento T5 (1,0 mg/L de BAP + 0,1 mg/L de GA_3) indujo numéricamente una alta división celular en número de brotes, carece de viabilidad técnica debido a la inestabilidad fisiológica que provoca en el explante.
- Al analizar la calidad morfofisiológica de las plantas *in vitro* se evidenció que el tratamiento T8 (2,0 mg/L de BAP + 0,1 mg/L de GA_3), produjo plantas con mayor vigor y mejor desarrollo vegetativo en comparación con los demás tratamientos. Asimismo, presentó una menor incidencia de alteraciones fisiológicas como hiperhidricidad y formación de callos, permitiendo obtener material vegetal de mejor calidad durante la fase de multiplicación *in vitro*.
- Al realizar el análisis costo/beneficio se determinó que el tratamiento T8 (2,0 mg/L de BAP + 0,1 mg/L de GA_3) fue el único económicamente viable, al presentar una relación beneficio/costo de 1,33 y una rentabilidad positiva de 0,33, permitiendo recuperar la inversión y generar un beneficio económico. En contraste, los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T9 registraron relaciones beneficio/costo inferiores a 1 y rentabilidades negativas, por lo que su implementación no resulta económicamente recomendable. Aunque para estos tratamientos se estimó un precio referencial de venta de USD 0,50 por planta con fines comparativos, la calidad morfológica del material vegetal obtenido, caracterizada por la presencia de callogénesis, menor vigor y menor desarrollo vegetativo, limita su potencial de comercialización. Por lo tanto, se concluye que la viabilidad económica de un protocolo de micropropagación

depende no solo de la cantidad de plantas producidas, sino también de la calidad del material vegetal, siendo el tratamiento T8 la mejor alternativa técnica y económica para la producción de vitroplantas de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.

5.2. RECOMENDACIONES

- Emplear la combinación hormonal correspondiente al tratamiento T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) como estándar en los protocolos institucionales de micropropagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola.
- Desarrollar futuras líneas de investigación que modulen otros factores (como la concentración de sacarosa o la ventilación de los frascos) en combinación con el tratamiento T8, con la finalidad de erradicar los remanentes de hiperhidricidad y callogénesis en explantes altamente sensibles.
- Escalar y transferir el protocolo del tratamiento T8 (2,0 mg/L BAP + 0,1 mg/L GA₃) a los programas de propagación masiva comercial y conservación *in vitro* de la región.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- El Hadrami, A. (2024). *Citoquininas: su papel en el crecimiento y el desarrollo*. Obtenido de https://omexcanada-com.translate.goog/blog/cytokinins-and-their-roles-in-growth-and-development/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Shah, S. M. M., Yaqoob, M., Ali, A., Yasmin, T., Sabir, S., & Waseem, M. (2021). Effect of gibberellic acid (GA₃) and kinetin on *in vitro* shoot multiplication of potato (*Solanum tuberosum* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, 26(4), 779-785.
- Ali, S., Khan, N., Nouroz, F., Erum, S., Nasim, W., & Shahid, M. (2022). *In vitro* effects of GA₃ on morphogenesis of CIP potato explants and acclimatization of plantlets in field. *Journal of Applied Botany and Food Quality*.
- Andrade-Piedra, J. L., Struik, P. C., Navarrete, I., & López, V. (2022). Agroecological settings and seed recycling account only partially for potato seed degeneration in Ecuador. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, Artículo 109. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00840-1>
- Navarrete, I., Parra-Rondinel, F., Scurrah, M., Bonifacio, A., & Andrade-Piedra, J. L. (2024). Recent developments for robust potato seed systems through agrobiodiversity and farmers engagement in the Andes. *Current Opinion in Environmental Sustainability*.
- Tessema, L., Chindi, A., & Solomon, A. (2023). Understanding and managing seed degeneration in potato: Implications for potato resilient seed system and food security. A review. *CABI Reviews*. <https://doi.org/10.1079/cabireviews.2023.0049>
- Ponce, M., et al. (2026). Effect of use of Certified Seed to Increase Potato (*Solanum tuberosum*) Production in Ecuador. *ResearchGate*.
- Chukwuka, K. S., et al. (2025). Optimized *in vitro* micropropagation and microtuber production in potato (*Solanum tuberosum* L.) through apical buds using hormone regulation and tissue culture techniques. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*.
- Bioprofi. (2024). Citoquininas y su interacción con otras fitohormonas en tejidos vegetales. Recuperado de repositorios científicos especializados en fisiología agrícola.

- Husen, A., et al. (2024). Physiological and molecular basis of hyperhydricity and vitrification in micropropagated plants: mechanisms and mitigation strategies. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*.
- Jácome Sarchi, G. A., Coronel Montesdeoca, N. T., De la Cruz Sarchi, S. A., Hernández, F., & Martínez, R. T. S. (2026). Acclimatization of *In vitro* Potato Plantlets: A Systematic Review of Media Formulation, Light Quality, and Bio-Priming Strategies. *Horticulturae*, 12(5), 597. <https://doi.org/10.3390/horticulturae12050597>
- Jácome Sarchi, G. A., Coronel Montesdeoca, N. T., Hernández, F., & Martínez, R. T. S. (2025). *In vitro* Techniques for Seed Potato (*Solanum tuberosum* L.) Tuber Production: A Systematic Review. *Plants*, 14(17), 2777. <https://doi.org/10.3390/plants14172777>
- Arteaga Chamorro, G. A., Ortiz Calle, R. S., & Cartagena Ayala, Y. E. (2022). Dinámica de la absorción de nutrientes en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Superchola, para la producción de semilla prebásica. *Siembra*, 9(2). Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/6538/653871546003/html/>
- Aryal, S. (2022). Micropropagación: Etapas, tipos y aplicaciones. Obtenido de <https://microbenotes.com/micropropagation-stages-types-applications-advantages-limitations/>
- Cheng, L., Lixiang, L., Xia, L., Tang, Z., & Zhang, F. (2023). Evolución *in vitro* del tubérculo fenotípico y fitohormonal endógeno inducido por citoquinina durante el desarrollo del tubérculo de patata (*Solanum tuberosum* L.). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2025.154632>
- Chimborazo Sangacha, E. J. (2026). Evaluación de explantes de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad iniap-natividad mediante propagación *in vitro* utilizando dos citoquininas en diferentes dosis. Obtenido de <https://dspace.ueb.edu.ec/server/api/core/bitstreams/197ffe14-bf4c-4097-9e25-020002885a22/content>
- Gabriel Diaz, Y. (2024). Producción de tubérculos a partir de semilla sexual de papa (*Solanum tuberosum*) de cuatro variedades obtenidas a partir de polinización abierta Yanahuanca. Daniel Alcides Carrión. Obtenido de http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/4298/1/T026_%2075769405_T.pdf
- George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G. J. (2021). *Plant Propagation by Tissue Culture: Volume 1. The Background*. Springer Nature. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=55X_Wjct7f0C&printsec=copyright&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- Guallpa, J. M. (2023). "Microtuberización *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. Var. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, Ambato.
- Guallpa, M. J. (2023). Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de Microtuberización *in vitro* de *Solanum tuberosum* variedad Superchola:

<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5a162316-288a-41a6-990a-d0c8f41c43c7/content>

Guamán Quispe, J. M. (2022). *Establecimiento de segmentos nodales de Vaccinium corymbosum L. (Var. Esmerald), en dos medios de cultivo mediante el manejo de factores del ecosistema in vitro*. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/fe8a2d3f-09c4-4d9e-954c-da4eea9c23db/content>

Hajare, S. T., Chauhan, N. M., & Kassa, G. (2021). *Effect of Growth Regulators on In vitro Micropropagation of Potato (Solanum tuberosum L.) Gudiene and Belete Varieties from Ethiopia*. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33628138/>

INIAP. (2026). *PAPA INIAP SUPERCHOLA*. Agroscopio: <https://agroscopio.com/producto/papa-superchola/?srsltid=AfmBOoqsCS7LwIWlgZY7CjJWYQkGAiDs7h0s0v8Z5X8bvgGUGaxyBP9n>

International Potato Center. (31 de Enero de 2023). Obtenido de Farmers experiencing potato seed degeneration respond but do not adjust their seed replacement strategies in Ecuador: https://cipotato.org/publications/farmers-experiencing-potato-seed-degeneration-respond-but-do-not-adjust-their-seed-replacement-strategies-in-ecuador/?utm_source=chatgpt.com

Kulus, D., & Tymoszek, A. (2024). *Advancements in In vitro Technology: A Comprehensive Exploration of Micropropagated Plants*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/377481857_Advancements_in_In_Vitro_Technology_A_Comprehensive_Exploration_of_Micropropagated_Plants

LatLong.info. (2023). *Tulcán, Carchi, Ecuador: Latitud y longitud*. Obtenido de LatLong.info: <https://latlong.info/es/ecuador/carchi/tulcan>

Leiva Mora, M. (2024). *Effect of different phytohormones on in vitro multiplication of Solanum tuberosum L. var. Cecilia*. doi:10.70099/BJ/2024.01.03.22

López Morales, J. E., & Companioni González, E. B. (2024). *Propagación in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales*. Obtenido de <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/50061>

López Ramos, Y., & Salomón Díaz, J. L. (2022). *La reproducción de tubérculos de papa (Solanum tuberosum L.), a partir de su semilla sexual*. Obtenido de <https://share.google/XJCS0sHm4Zve5uh47>

Majumder, S., Igamberdiev, A., & Debnath, S. (2025). *Somaclonal Variation and Clonal Fidelity in Commercial Micropropagation: Challenges and Perspectives*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/agronomy15061489>

Malabadi, R. B., Chalannavar, R. K., & Kolkar, K. P. (2025). *Plant cell totipotency: Plant tissue culture applications-An updated review*. doi:<https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.16.2.1262>

- Mohamed, A.-S., & Girgis, N. D. (2023). *Factors affecting in vitro tuberization of potato. Bulletin of the National Research Centre*. Obtenido de https://link.springer.com/article/10.1186/s42269-023-01056-3?utm_source=chatgpt.com
- Montenegro, J. J. (2024). *Efecto de la citoquinina en la multiplicación in vitro de arándano (Vaccinium corymbosum) variedad Biloxi a partir de segmentos nodales*. Tesis de pregrado, Universidad Agraria del Ecuador. Obtenido de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MONTENEGRO%20HERMOSILLA%20JOSE%20JOAQUIN.pdf>
- Nagy, A. M., Oros, P., Cătană, C., Antofie, M. M., & Sava Sand, C. (2023). *In vitro Cultivation of Purple-Fleshed Potato Varieties: Insights into Their Growth and Development. Horticulturae*. Obtenido de https://www.mdpi.com/2311-7524/9/4/425?utm_source=chatgpt.com
- Nezami Alanagh, E. (2024). Efficiency of Plant Preservative Mixture (PPM) in controlling endogenous bacterial contamination in woody and herbaceous explants without compromising phytotoxicity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(2), 341-356.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *El periplo de la papa a través de épocas y continentes*. Obtenido de <https://www.fao.org/newsroom/story/the-potatos-travel-through-ages-and-continents/es>
- Paradiso, R., & Proietti, S. (2022). *Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
- Pineda Lázaro, A. J., Hernández Amasifuen, A. D., & Díaz Pillasca, H. B. (2021). Multiplicación y reducción del crecimiento *in vitro* de papa chaucha (*Solanum tuberosum* L. grupo Phureja). *Manglar*, 18(2), 123-128. doi:<http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.016>
- Polivanova, O. B., & Bedarev, V. A. (2022). Hyperhydricity in Plant Tissue Culture. *Plants*, 11(23), 3313. doi:10.3390/plants11233313
- Reinoso, C. E. (2025). *Uso y dosificación de reguladores de crecimiento en la micropropagación del portainjerto Natal Briar para Rosa sp.* Trabajo de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/6c38309b-57ca-4b9d-93ff-12d16e9d0457/content>
- Rodríguez Dominguez, J. M., Castañeda Nava, J. J., Toro de la Cruz, F. O., Gutiérrez Mora, A., & Plaza Ávila, A. P. (2021). *Manual de prácticas de laboratorio para la micropropagación de plantas*. Obtenido de https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_61a18db854d35.pdf
- Saidi, A., & Hajjibarat, Z. (2021). Phytohormones: plant switchers in developmental and growth stages in potato. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(89), 1–17. doi:10.1186/s43141-021-00192-5

- Sangacha, J. E. (2026). *UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR*. Obtenido de evaluación de explantes de papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad INIAP-Natividad mediante propagación *in vitro* utilizando dos citoquininas en diferentes dosis: <https://dspace.ueb.edu.ec/server/api/core/bitstreams/197ffe14-bf4c-4097-9e25-020002885a22/content>
- Sharma, S., Pandey, A., & Tiwari, S. (2022). *Advances in micropropagation techniques for potato (Solanum tuberosum L.)*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11816-022-00745-3>
- Silva Agurto, C. L., Leiva Mora, M., Córdova Frías, F. S., Tipán Chinachi, W. E., Gómez Pinto, T., Jiménez González, A., . . . Rojas Rojas, J. A. (2024). Effect of different phytohormones on *in vitro* multiplication of *Solanum tuberosum* L. var. Cecilia. *Bionatura Journal*, 1(3), 22. doi:<https://doi.org/10.70099/BJ/2024.01.03.22>
- Stupko, V. Y., & Lugovtsova, S. Y. (2023). The use of phytohormones to increase the efficiency of potato propagation in nodal cuts culture. *Krasnoyarsk Agricultural Research Institute*, 66(01006). doi:<https://doi.org/10.1051/bioconf/20236601006>
- Velásquez Carrera, J. S., Andrade Estrada, V., Araujo Jaramillo, M. A., Rivadeneira Ruales, J. E., & Tinoco Salazar, K. (2021). *Manual de producción de tubérculo semilla de papa*. Quito. Obtenido de <https://repositorio.iniap.gob.ec/items/73822c5b-51e0-4290-a769-ceaa33d88844>
- Ventocilla Sanchez, M. K. (2024). *Efecto de los reguladores de crecimiento en la multiplicación in vitro de papa (Solanum tuberosum Var. Bicentenaria)*. tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJF_e7fb04a1e4280ed040456cd87e4d2e05/Description#tabnav
- Zhang, X., Fujino, K., & Shimura, H. (2023). Transcriptomic analyses reveal the role of cytokinin and the nodal stem in microtuber sprouting in potato (*Solanum tuberosum* L.). *International journal of molecular sciences*, 24, 17534. doi:10.3390/ijms242417534

VII. ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI FOREIGN AND
NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAMES: Romero Morales Kevin Andrés; Tacán Narváez Karen Vanessa DATE: Monday, August 31st, 2026 Topic: "Effect of the Cytokinin-Gibberellin interaction on the efficiency of in vitro micropropagation of Solanum tuberosum L. Superchola variety from nodal segments"				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 ☒	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
De	EXCELLENT: 2 ☒	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identify the type of text	The message has been communicated appropriately and identify the type of text	Some of the message has been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 ☒	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 ☒	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
TOTAL/AVERAGE	9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED			
		TOTAL 9		



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI- FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES CENTER

Informe sobre el Abstract de Artículo Científico o Investigación.

Autores: Romero Morales Kevin Andrés; Tacán Narváez Karen Vanessa

Fecha de recepción del abstract: martes, 18 de agosto del 2026

Fecha de entrega del informe: lunes, 31 de agosto del 2026

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

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

Observaciones:

Tras evaluar el resumen presentado, se concluye que la traducción al inglés es adecuada y fiel al contenido. De acuerdo con la rúbrica aplicada para su valoración, se le asigna una calificación de 9, por lo que el trabajo queda aprobado.

Atentamente



UPEL
Código Único de Verificación en línea:
Código de Verificación por:
MARtha VIVEROS
VIVEROS ALMENDA

MA. Martha Viveros
RESPONSABLE CIDEN

Anexo 2. Acta de entrega-recepción de las plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Superchola



REPÚBLICA
DEL ECUADOR

Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias

Acta de Entrega - Recepción

No. DNB-05-2026

En las instalaciones de la Estación Experimental Santa Catalina (EESC) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ubicadas en el cantón Mejía, provincia de Pichincha, a los 19 días del mes de febrero 2026, comparece por una parte el personal técnico del Departamento Nacional de Biotecnología (DNB) de la EESC-INIAP y por otra parte la Srta. Karen Tacán con el objeto de realizar el acta entrega recepción parcial de *in vitro* plantas de papa var. Superchola

1.- ANTECEDENTES

La Srta. Karen Tacán solicita al INIAP la producción de *in vitro* plantas de papa var. Superchola. El INIAP en respuesta a lo solicitado por la Srta. Karen Tacán, presenta un plan de producción de papa var. Superchola, comprometiéndose a la entrega de 750 *in vitro* plantas de papa var. INIAP Andimora. Se emite la factura No. 001-001-0014941 por 465,00 USD la misma que fue cancelada mediante comprobante Nro. 29690962 del 12 diciembre de 2025, por el valor de \$465.00 correspondiente a la cancelación total del servicio.

2.- CRONOGRAMA DE ENTREGA

El DNB entrega a la Srta. Karen Tacán las *in vitro* plantas de papa var. Superchola, según cronograma elaborado y aprobado por el solicitante, el cual se detalla a continuación:

VARIEDAD	Febrero 2026	Marzo 2026
Papa var Superchola testeada y garantizada	250 plantas	500 plantas

3.- RECEPCIÓN

Para efectos de la presente acta, se detalla la cantidad de *in vitro* plantas entregadas a la Srta. Karen Tacán (fotos en anexo)

Cantidad	Detalle	Valor unitario USD	Valor total USD
250	<i>In vitro</i> plantas de papa var. Superchola testeada y garantizada	0,62	155,00
250	TOTAL		\$155.00

Se deja constancia que el material entregado son los detallados en el cuadro anterior y que se encuentran a completa conformidad la señorita Karen Tacán

El material entregado deberá ser conservado en condiciones de asepsia en un cuarto de crecimiento a 18°C a una humedad relativa de 50%.

El material se entrega en 125 tubos de ensayo con tapa. Estos deberán ser devueltos a la brevedad posible al DNB-EESC.

El uso que se le dé a las *in vitro* plantas de papa var. superchola detalladas en esta acta, una vez salido del DNB-EESC es de entera responsabilidad de la señorita Karen Tacán.

Estación Experimental Santa Catalina
Dirección: Panamericana Sur Km 1, sector Cutuglagua,
cantón Mejía, Pichincha.
Teléfono: +593 - 3076002
www.iniap.gob.ec

EL NUEVO
ECUADOR

Anexo 3. Procedimiento experimental



Figura 11. INIAP Santa Catalina



Figura 12. Material vegetal *in vitro*



Figura 13. Lab. de Biotecnología vegetal



Figura 14. Preparación del medio de cultivo



Figura 15. Esterilización de medios y materiales



Figura 16. Preparación explantes



Figura 17. Siembra de explantes



Figura 18. Área de crecimiento *in vitro*



Figura 19. Evaluación de brotes y nudos



Figura 20. Medición de longitud



Figura 21. Medición diámetro de tallo



Figura 22. Determinación de biomasa



Figura 23. Secado de muestras



Figura 24. Desarrollo de vitroplantas



Figura 25. Índice de vigor e hiperhidricidad



Figura 26. Formación de callo

Anexo 4. Script para realizar el análisis estadístico en R Studio

SCRIPT DCA ANOVA

```
#
=====

=====

# 🐼 SCRIPT DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO: EXPERIMENTO DE MULTIPLICACIÓN IN VITRO
# Optimizado para análisis de interacción bifactorial, CV y Transformación
#
=====

=====

# 1. CARGA DE LIBRERÍAS -----
library(readxl)
library(agricolae)
library(car)
library(ggplot2)
library(dplyr) # Vital para resumir medias reales y SD.

# 2. IMPORTACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS -----
# Reemplaza la ruta con la ubicación exacta de tu archivo

library(readxl)
datos <- read_excel("DATA TESIS VARIABLES GENERALES TESIS RSTUDIO.xlsx",
                    sheet = "DATA")
View(datos)
# Convertir las variables independientes y repeticiones a FACTORES
datos$BAP <- as.factor(datos$BAP)
datos$GA3 <- as.factor(datos$GA3)
datos$Rep <- as.factor(datos$Rep)

# Variable de respuesta inicial (Datos Crudos)
variable_analisis <- datos$D7_nudos
# 3. EVALUACIÓN DE SUPUESTOS (DATOS CRUDOS) -----
```

```

modelo_brotes <- aov(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos)

cat("\n--- Prueba de Shapiro-Wilk (Normalidad - Datos Crudos) ---\n")
# Si p > 0,05, los datos son normales. Si p < 0,05, NO son normales.
print(shapiro.test(residuals(modelo_brotes)))

cat("\n--- Prueba de Levene (Homocedasticidad - Datos Crudos) ---\n")
# Si p > 0,05, las varianzas son homogéneas. Si p < 0,05, hay heterocedasticidad.
print(leveneTest(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos))

#
=====
=====
# 🚧 PLAN B: TRANSFORMACIÓN DE DATOS (SI SHAPIRO O LEVENE FALLAN, p < 0,05)
# Si las pruebas anteriores arrojaron p < 0,05, descomenta (quita el #) a las
# siguientes 7 líneas. Esto aplicará la transformación de raíz cuadrada, redefinirá
# tu modelo y volverá a probar los supuestos automáticamente.
#
=====
=====

datos$Brotes_Transf <- sqrt(datos$D7_nudos + 0,5)
variable_analisis <- datos$Brotes_Transf
modelo_brotes <- aov(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos)

cat("\n--- NUEVA Prueba de Shapiro-Wilk (Datos Transformados) ---\n")
print(shapiro.test(residuals(modelo_brotes)))
cat("\n--- NUEVA Prueba de Levene (Datos Transformados) ---\n")
print(leveneTest(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos))

#
=====
=====

```

```

# 4. TABLA ANOVA, MEDIA GLOBAL Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV) -----
cat("\n--- Tabla ANOVA (Interacción BAP x GA3) ---\n")
print(summary(modelo_brotes))

media_global <- mean(variable_analisis, na.rm = TRUE)
cv_global <- cv.model(modelo_brotes)

cat("\n--- Estadísticas de Dispersión Generales ---\n")
cat("Media Global del Modelo: ", round(media_global, 2), "\n")
cat("Coeficiente de Variación (CV): ", round(cv_global, 2), "%\n")

# 5. PRUEBA DE MEDIAS (TUKEY) PARA LA INTERACCIÓN -----
# Se aplica sobre 'variable_analisis' (cruda o transformada, según lo que activaste)
tukey_brotes <- HSD.test(y = variable_analisis,
                        trt = interaction(datos$BAP, datos$GA3),
                        DFerror = modelo_brotes$df.residual,
                        MSerror = deviance(modelo_brotes) / modelo_brotes$df.residual,
                        group = TRUE,
                        console = TRUE)

# 6. CREACIÓN DE TABLA RESUMEN PARA PUBLICACIÓN -----
# NOTA CIENTÍFICA: Aquí siempre calculamos la media sobre 'Brotes1' (datos reales),
# garantizando que el paper muestre valores biológicos reales, cruzados con las
# letras estadísticas correctas.
tabla_resumen <- datos %>%
  group_by(BAP, GA3) %>%
  summarise(Promedio = mean(D7_nudos, na.rm = TRUE),
            Desviacion_Estandar = sd(D7_nudos, na.rm = TRUE),
            n = n(),
            .groups = 'drop')

tabla_resumen$Tratamiento <- paste(tabla_resumen$BAP, tabla_resumen$GA3,
sep=".")

```

```
grupos_tukey <- data.frame(Tratamiento = rownames(tukey_brotes$groups),
                          Grupo_Tukey = tukey_brotes$groups$groups)
```

```
tabla_final <- merge(tabla_resumen, grupos_tukey, by="Tratamiento")
tabla_final <- tabla_final %>% arrange(desc(Promedio))
```

```
cat("\n--- Tabla Resumen (Lista para el Manuscrito) ---\n")
print(tabla_final)
```

```
# 7. GRÁFICO DE INTERACCIÓN -----
```

```
# El gráfico también se alimenta de los promedios biológicos reales.
```

```
grafico_brotes <- ggplot(datos, aes(x = BAP, y = D7_nudos, group = GA3, color = GA3))
+
  stat_summary(fun = mean, geom = "point", size = 3) +
  stat_summary(fun = mean, geom = "line", size = 1) +
  stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0,1) +
  labs(title = "Efecto de la Interacción BAP x GA3 en la Proliferación de Brotes",
       x = "Concentración de BAP (mg/L)",
       y = "Número Promedio de Brotes",
       color = "GA3 (mg/L)") +
  theme_classic() +
  theme(text = element_text(size = 12),
        plot.title = element_text(hjust = 0,5, face = "bold"))
```

```
print(grafico_brotes)
```

SCRIPT DCA NO PARAMETRICA

```
#
```

```
=====
=====
```

```
# SCRIPT DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO: EXPERIMENTO DE MULTIPLICACIÓN IN VITRO
```

```
# Flujo Integral: Datos Crudos, Transformación y Alternativa No Paramétrica
```

```
#
```

```
=====
=====
```

```

# 1. CARGA DE LIBRERÍAS -----
library(readxl)
library(agricolae)
library(car)
library(ggplot2)
library(dplyr)

# 2. IMPORTACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS -----
datos <- read_excel("C:/Users/USER/OneDrive - Universidad Politécnica Estatal del
Carchi/Escritorio/BROTES.xlsx")

# Convertir las variables independientes y repeticiones a FACTORES
datos$BAP <- as.factor(datos$BAP)
datos$GA3 <- as.factor(datos$GA3)
datos$Rep <- as.factor(datos$Rep)

# Crear un factor de interacción explícito (Clave para Tukey y Kruskal-Wallis)
datos$Tratamiento <- interaction(datos$BAP, datos$GA3)

# 3. EVALUACIÓN DE SUPUESTOS (DATOS CRUDOS) -----
variable_analisis <- datos$Brotos1
modelo_brotos <- aov(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos)

cat("\n--- Prueba de Shapiro-Wilk (Normalidad - Datos Crudos) ---\n")
print(shapiro.test(residuals(modelo_brotos)))

cat("\n--- Prueba de Levene (Homocedasticidad - Datos Crudos) ---\n")
print(leveneTest(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos))

#
=====
=====

# PLAN B: TRANSFORMACIÓN DE DATOS (Descomentar si p < 0,05 en pruebas previas)

```

```

#
=====

=====
# datos$Brotos_Transf <- sqrt(datos$Brotos1 + 0,5)
# variable_analisis <- datos$Brotos_Transf
# modelo_brotos <- aov(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos)
# cat("\n--- NUEVA Prueba de Shapiro-Wilk (Datos Transformados) ---\n")
# print(shapiro.test(residuals(modelo_brotos)))
# cat("\n--- NUEVA Prueba de Levene (Datos Transformados) ---\n")
# print(leveneTest(variable_analisis ~ BAP * GA3, data = datos))

#
=====

=====
# PLAN C: ESTADÍSTICA NO PARAMÉTRICA (Si la transformación falla)
# Kruskal-Wallis se hace sobre los datos crudos (Brotos1) usando la interacción.
#
=====

=====
cat("\n--- Prueba No Paramétrica de Kruskal-Wallis ---\n")
kruskal_brotos <- kruskal(y = datos$Brotos1,
                        trt = datos$Tratamiento,
                        group = TRUE,
                        p.adj = "bonferroni",
                        console = TRUE)

#
=====

=====
# 4. TABLA RESUMEN PARA EL MANUSCRITO (Ruta No Paramétrica)
#
=====

=====
# Si decides usar ANOVA (Plan A o B), usa HSD.test() y cambia 'kruskal_brotos'

```

```
# por 'tukey_brotes' en el bloque de abajo.
```

```
tabla_resumen <- datos %>%  
  group_by(BAP, GA3) %>%  
  summarise(Promedio = mean(Brotes1, na.rm = TRUE),  
            Desviacion_Estandar = sd(Brotes1, na.rm = TRUE),  
            Mediana = median(Brotes1, na.rm = TRUE), # Vital para no paramétrica  
            IQR = IQR(Brotes1, na.rm = TRUE),      # Rango intercuartílico  
            n = n(),  
            .groups = 'drop')
```

```
tabla_resumen$Tratamiento <- interaction(tabla_resumen$BAP, tabla_resumen$GA3)
```

```
# Extracción de letras del modelo Kruskal-Wallis
```

```
grupos_letras <- data.frame(Tratamiento = rownames(kruskal_brotes$groups),  
                             Grupo_Sig = kruskal_brotes$groups$groups)
```

```
tabla_final <- merge(tabla_resumen, grupos_letras, by="Tratamiento")  
tabla_final <- tabla_final %>% arrange(desc(Mediana), desc(Promedio))
```

```
cat("\n--- Tabla Resumen No Paramétrica (Lista para el Manuscrito) ---\n")  
print(tabla_final)
```

```
# 5. GRÁFICO DE CAJAS (Estándar para datos No Paramétricos) -----
```

```
# Para datos que no cumplen normalidad, el Boxplot es más honesto que el gráfico  
de líneas y barras de error.
```

```
grafico_cajas <- ggplot(datos, aes(x = BAP, y = Brotes1, fill = GA3)) +  
  geom_boxplot(outlier.colour = "red", outlier.shape = 16, alpha=0,7) +  
  labs(title = "Efecto de BAP y GA3 en la Inducción de Brotes (Día 28)",  
        subtitle = "Análisis mediante prueba de Kruskal-Wallis",  
        x = "Concentración de BAP (mg/L)",  
        y = "Número de Brotes (Mediana e IQR)",  
        fill = "GA3 (mg/L)") +  
  theme_classic() +
```

```

scale_fill_brewer(palette = "Set1") +
theme(text = element_text(size = 12),
      plot.title = element_text(hjust = 0,5, face = "bold"),
      plot.subtitle = element_text(hjust = 0,5, face = "italic"))

print(grafico_cajas)

```

VARIABLES POR SEPARADO/CUALITATIVAS/VIGOR

```

#
=====

=====

# SCRIPT ACTUALIZADO PARA VARIABLES CUALITATIVAS ORDINALES (Escala 1 al 3)
# Variable: Índice de Vigor Morfológico (IVM)
# Prueba: Kruskal-Wallis + Comparaciones Múltiples de Tratamientos
#
=====

=====

# 1. CARGA DE LIBRERÍAS -----
library(dplyr)    # Para manipular datos
library(ggplot2)  # Para graficar
library(readxl)   # Para leer el archivo de Excel
library(agricolae) # EL MEJOR paquete agrícola para Kruskal-Wallis y letras

# 2. IMPORTACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS -----
# Asegúrate de poner la ruta correcta de tu nuevo archivo
library(readxl)
datos_vigor <- read_excel("C:/Users/USER/OneDrive - Universidad Politécnica Estatal
del Carchi/Escritorio/VC VIGOR.xlsx")
View(datos_vigor)

# TRUCO: Vamos a estandarizar los nombres de las columnas para evitar errores
# con los espacios en "Índice de Vigor 6" y cambiar "Trat" a "Tratamiento"
colnames(datos_vigor)[1] <- "Tratamiento"

```

```

colnames(datos_vigor)[4] <- "Vigor"

# Convertir el tratamiento a factor (categoría)
datos_vigor$Tratamiento <- as.factor(datos_vigor$Tratamiento)

# Asegurarnos de que el vigor sea numérico para la prueba de Kruskal
datos_vigor$Vigor <- as.numeric(datos_vigor$Vigor)

# Crear la versión categórica para la nueva escala de 3 niveles
datos_vigor$Vigor_Cat <- factor(datos_vigor$Vigor,
                                levels = c(1, 2, 3),
                                labels = c("1 - Deficiente",
                                             "2 - Regular",
                                             "3 - Vigoroso"))

# 3. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA (Medianas) -----
cat("\n--- TABLA DE MEDIANAS POR TRATAMIENTO ---\n")
tabla_descriptiva <- datos_vigor %>%
  group_by(Tratamiento) %>%
  summarise(
    Total_Plantas = n(),
    Mediana_Vigor = median(Vigor),
    # Ahora la nota de excelencia (Élite) es el 3
    Plantas_Elite_Vigor3 = sum(Vigor == 3)
  )
print(tabla_descriptiva)

# 4. PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS Y LETRAS (El motor estadístico) -----
cat("\n--- RESULTADOS KRUSKAL-WALLIS Y GRUPOS DE SIGNIFICANCIA (Letras) ---\n")

# Ajuste estricto Bonferroni para revistas Q1 y tesis de grado
kruskal_vigor <- kruskal(datos_vigor$Vigor,
                        datos_vigor$Tratamiento,
                        group = TRUE,

```

```

p.adj = "bonferroni")

# Imprimir las letras y los grupos que irán a la tabla de la tesis
print(kruskal_vigor$groups)
print(kruskal_vigor$statistics)

# 5. GRÁFICO DE BARRAS APILADAS (Ajustado para 3 niveles) -----
grafico_vigor <- ggplot(datos_vigor, aes(x = Tratamiento, fill = Vigor_Cat)) +
  geom_bar(position = "fill", color = "black", width = 0,7) +
  scale_y_continuous(labels = scales::percent) +
  labs(title = "Distribución del Índice de Vigor Morfológico",
        x = "Tratamiento",
        y = "Porcentaje de Plantas",
        fill = "Escala de Vigor (1 al 3)") +
  theme_classic() +
  # Usamos solo 3 colores: Rojo (Deficiente), Amarillo (Regular), Verde (Vigoroso)
  scale_fill_manual(values = c("1 - Deficiente" = "#d73027",
                                "2 - Regular"   = "#fee08b",
                                "3 - Vigoroso"  = "#1a9850")) +
  theme(text = element_text(size = 12),
        plot.title = element_text(hjust = 0,5, face = "bold"))

print(grafico_vigor)

```

VARIABLES POR SEPARADO/CUALITATIVAS/CALLOS.R

```

#
=====

# SCRIPT PARA VARIABLES CUALITATIVAS BINARIAS (0 y 1)

# Variable: Formación de Callo (Callogénesis)

# Modelo: Regresión Logística (GLM Binomial)

```

```

#
=====

# 1. CARGA DE LIBRERÍAS -----
library(dplyr)    # Para manipular datos
library(ggplot2)  # Para graficar
library(multcomp) # Para generar las letras de los grupos
library(car)      # Para la prueba Chi-cuadrado del modelo
library(readxl)   # Para leer tu archivo de Excel

# 2. IMPORTACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS -----
# Reemplaza la ruta con la ubicación real de tu archivo CALLO.xlsx
library(readxl)

datos_callo <- read_excel("C:/Users/USER/OneDrive - Universidad Politécnica Estatal
del Carchi/Escritorio/CALLO.xlsx")

View(datos_callo)

# Renombrar la columna 4 para quitar los espacios y evitar errores en R
colnames(datos_callo)[4] <- "Callo"

# Convertir el tratamiento a factor (categoría)
datos_callo$Tratamiento <- as.factor(datos_callo$Tratamiento)

# Asegurarnos de que la variable respuesta sea numérica (0 y 1)
datos_callo$Callo <- as.numeric(datos_callo$Callo)

```

3. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA (Frecuencias y Porcentajes) -----

```
cat("\n--- TABLA DE FRECUENCIAS Y PORCENTAJES ---\n")
```

```
tabla_frecuencias_callo <- datos_callo %>%
```

```
  group_by(Tratamiento) %>%
```

```
  summarise(
```

```
    Total_Explantes = n(),
```

```
    Sin_Callo_0 = sum(Callo == 0),
```

```
    Con_Callo_1 = sum(Callo == 1),
```

```
    Porcentaje_Callogenesis = (Con_Callo_1 / Total_Explantes) * 100
```

```
  )
```

```
print(tabla_frecuencias_callo)
```

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL (GLM Binomial) -----

```
modelo_binomial_callo <- glm(Callo ~ Tratamiento,
```

```
  data = datos_callo,
```

```
  family = binomial(link = "logit"))
```

5. PRUEBA DE SIGNIFICANCIA GLOBAL (Aquí sale tu P-VALOR) -----

```
cat("\n--- PRUEBA DE SIGNIFICANCIA GLOBAL (Chi-cuadrado) ---\n")
```

```
anova_callo <- Anova(modelo_binomial_callo, type = "II", test = "Wald")
```

```
print(anova_callo)
```

```
# ¡OJO AQUÍ! Revisa la columna Pr(>Chisq). Ese es tu p-valor.
```

6. COMPARACIONES MÚLTIPLES DIRECTAS (Separación de grupos con letras) -----

```
cat("\n--- GRUPOS DE SIGNIFICANCIA (Letras para la Tabla) ---\n")
```

```
# Comparamos todos los tratamientos entre sí (Tukey)
```

```
comparaciones_callo <- glht(modelo_binomial_callo, linfct = mcp(Tratamiento =
"Tukey"))
```

```
# Generamos las letras automáticamente
grupos_callo <- cld(comparaciones_callo)
print(grupos_callo)
```

```
# 7. GRÁFICO DE BARRAS APILADAS -----
```

```
# Etiquetas para el gráfico
```

```
datos_callo$Estado_Callo <- ifelse(datos_callo$Callo == 1,
    "Con Callo (1)",
    "Sin Callo (0)")
```

```
grafico_callo <- ggplot(datos_callo, aes(x = Tratamiento, fill = Estado_Callo)) +
  geom_bar(position = "fill", color = "black", width = 0,7) +
  scale_y_continuous(labels = scales::percent) +
  labs(title = "Proporción de Callogénesis por Tratamiento a los 28 días",
    x = "Tratamiento",
    y = "Porcentaje de Explantes",
    fill = "Formación de Callo") +
  theme_classic() +
  # Usamos color verde para plántulas "limpias" y un color marrón/crema para el callo
  scale_fill_manual(values = c("Sin Callo (0)" = "#4CAF50",
    "Con Callo (1)" = "#D7CCC8")) +
  theme(text = element_text(size = 12),
    plot.title = element_text(hjust = 0,5, face = "bold"))
```

```
print(grafico_callo)
```

VARIABLES POR SEPARADO/CUALITATIVAS/HIPERHIDRICIDAD.R

```
# SCRIPT PARA VARIABLES CUALITATIVAS BINARIAS (0 y 1)
```

```
# Variable: Hiperhidricidad
```

```
# Modelo: Regresión Logística (GLM Binomial)
```

```
#
```

```
=====
```

```
=====
```

```
# 1. CARGA DE LIBRERÍAS -----
```

```
library(dplyr)    # Para manipular datos
```

```
library(ggplot2)  # Para graficar
```

```
library(emmeans)  # Para medias marginales estimadas (proporciones)
```

```
library(multcomp) # Para generar las letras de los grupos
```

```
library(multcompView)
```

```
library(car)      # Para la prueba Chi-cuadrado del modelo
```

```
# 2. IMPORTACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS -----
```

```
# Reemplaza "ruta/a/tu/archivo" con la ubicación real de tu CSV
```

```
library(readxl)
```

```
datos_hiper <- read_excel("C:/Users/USER/OneDrive - Universidad Politécnica Estatal  
del Carchi/Escritorio/HIPERHIDRICIDAD.xlsx",
```

```
    sheet = "Hoja1")
```

```
View(datos_hiper)
```

```
# Convertir el tratamiento a factor (categoría)
```

```
datos_hiper$Tratamiento <- as.factor(datos_hiper$Tratamiento)
```

```
# Asegurarnos de que la variable respuesta sea numérica (0 y 1) para el modelo
datos_hiper$D28_Hiperhidricidad <- as.numeric(datos_hiper$D28_Hiperhidricidad)
```

```
# 3. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA (Frecuencias y Porcentajes) -----
```

```
cat("\n--- TABLA DE FRECUENCIAS Y PORCENTAJES ---\n")
```

```
tabla_frecuencias <- datos_hiper %>%
```

```
  group_by(Tratamiento) %>%
```

```
  summarise(
```

```
    Total_Explantos = n(),
```

```
    Casos_Sanos_0 = sum(D28_Hiperhidricidad == 0),
```

```
    Casos_Hiperhidricos_1 = sum(D28_Hiperhidricidad == 1),
```

```
    Porcentaje_Hiperhidricidad = (Casos_Hiperhidricos_1 / Total_Explantos) * 100
```

```
  )
```

```
print(tabla_frecuencias)
```

```
# 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL (GLM Binomial) -----
```

```
# Se usa un Modelo Lineal Generalizado para datos binarios (0,1)
```

```
modelo_binomial <- glm(D28_Hiperhidricidad ~ Tratamiento,
```

```
  data = datos_hiper,
```

```
  family = binomial(link = "logit"))
```

```
# 5. PRUEBA DE SIGNIFICANCIA GLOBAL (Equivalente al p-valor general) -----
```

```
cat("\n--- PRUEBA DE SIGNIFICANCIA GLOBAL (Chi-cuadrado) ---\n")
```

```
anova_modelo <- Anova(modelo_binomial, type = "II", test = "Wald")
```

```
print(anova_modelo)
```

```

# 6. COMPARACIONES MÚLTIPLES DIRECTAS (Separación de grupos con letras) -----
cat("\n--- GRUPOS DE SIGNIFICANCIA (Letras para la Tabla) ---\n")

# Cargamos la librería clásica para comparaciones
library(multcomp)

# Le pedimos al modelo que compare todos los tratamientos entre sí (Tukey)
comparaciones <- glht(modelo_binomial, linfct = mcp(Tratamiento = "Tukey"))

# Generamos las letras automáticamente
grupos_hiper <- cld(comparaciones)

# Imprimimos el resultado con las letras
print(grupos_hiper)

# Si quieres ver el detalle de los p-valores entre cada par de tratamientos:
cat("\n--- DETALLE DE P-VALORES (Opcional) ---\n")
summary(comparaciones)

# 7. GRÁFICO DE BARRAS APILADAS (El mejor para variables cualitativas) -----
# Creamos una columna de texto solo para que el gráfico tenga etiquetas bonitas
datos_hiper$Estado <- ifelse(datos_hiper$D28_Hiperhidricidad == 1,
                             "Hiperhídrico (Translúcido)",
                             "Sano (Opaco)")

grafico_cuali <- ggplot(datos_hiper, aes(x = Tratamiento, fill = Estado)) +
  geom_bar(position = "fill", color = "black", width = 0,7) +

```

```

scale_y_continuous(labels = scales::percent) +
labs(title = "Proporción de Hiperhidricidad por Tratamiento a los 28 días",
      x = "Tratamiento",
      y = "Porcentaje de Explantes",
      fill = "Estado del Tejido") +
theme_classic() +
scale_fill_manual(values = c("Sano (Opaco)" = "#4CAF50",
                             "Hiperhídrico (Translúcido)" = "#F44336")) +
theme(text = element_text(size = 12),
      plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"))

print(grafico_cuali)

```