



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA SOBRE LA TASA DE
MULTIPLICACIÓN DE SEMILLA DE *Solanum tuberosum* L. EN UN SISTEMA
AEROPÓNICO**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA FITOTECNISTA
P R E S E N T A:**

MARÍA DEL ROCÍO ESPINOSA CISNEROS

Modalidad: Tesis individual

Generación: 43^{ava}

ASESORES:

**DR. MARTÍN RUBÍ ARRIAGA
DR. ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA**

**CAMPUS UNIVERSITARIO “EL CERRILLO”. EL CERRILLO PIEDRAS
BLANCAS, MUNICIPIO DE TOLUCA, MÉXICO. ENERO DE 2025.**

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIAS	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE DE CUADROS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
II. OBJETIVOS	12
2.1 General	12
2.2 Particulares	12
III. HIPOTESIS	13
IV. JUSTIFICACIÓN	14
V. REVISIÓN DE LITERATURA	16
5.1 Origen de la papa	16
5.2 Importancia de la especie	16
5.3 Producción a nivel mundial	17
5.4 Variedad Fianna	17
5.5 Producción de semilla prebásica	18
5.6 Calidad de semilla	19
5.7 Solución nutritiva	20
5.8 Fuente de nutrientes	23
5.9 La Aeroponía	23
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	26
6.1 Localización del experimento	26
6.2 Manejo del experimento	28
6.2.1 Adaptación	28
6.2.2 Requerimientos nutricionales	30
6.2.3 Variables evaluadas	38
6.2.4 Diseño experimental y tamaño de la unidad de muestreo	41

6.2.5 Cosecha de minitubérculos	42
6.2.6 Análisis de datos.....	42
VII. RESULTADOS	43
7.1 Número promedio de mini tubérculos en seis cosechas (X1)	43
7.2 Altura de Tallo al Trasplante	45
7.2.1 Altura de tallo 20 días después del trasplante	46
7.2.2 Altura de tallo a los 47 días del trasplante	47
7.2.3. Altura de tallo a los 60 días del trasplante	48
7.3 Longitud de raíz al trasplante	49
7.3.1. Largo de raíz a los 20 días del trasplante.....	50
7.3.2 Largo de raíz a los 47 días del trasplante.....	51
7.3.3 Largo de raíz a los 60 días del trasplante.....	52
7.4 Diámetro del tallo al trasplante.....	53
7.4.1 Diámetro del tallo a inicio de cosecha	54
VIII. DISCUSIÓN	56
8.1 Crecimiento reproductivo (Número promedio de mini tubérculos).....	56
8.2 Crecimiento vegetativo (Altura de tallo).....	58
8.4 Diámetro del tallo a inicio de la cosecha	59
IX. CONCLUSIONES	61
X. RECOMENDACIONES	62
XI. BIBLIOGRAFIA.....	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página.
1	Conductividad eléctrica por etapa de cultivo.	33-35
2	Requerimientos nutrimentales para integrar la Solución Steiner	39
3	Requerimientos nutrimentales para integrar la Solución Ferran.	40
4	Requerimientos nutricionales para la solución Haifa.	40
5	Requerimientos nutrimentales para integrar la Solución Ferrán Adaptada.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página.
1	Ubicación de invernaderos	29
2	Instalaciones de la Empresa	30
3	Producción de minitubérculos de papa	30
4	Proceso de adaptación de las plántulas.	31
5	Sistema de burbujeo en cuarto de adaptación	32
6	Trasplante a módulo aeropónico.	32
7	Etapas vegetativa en el cual tiene una C.E de 0.8 a 1.0 ds-m	36
8	Inicio de la tuberización teniendo una C.E de 1.2 ds-m	37
9	Llenado de minitubérculo en esta etapa la C.E es de 1.5 a 1.8 ds-m	37
10	Inicio de cosecha	38
11	Medición de altura de tallo. (Elaboración propia).	42
12	Medición de diámetro del tallo. (Elaboración propia).	42
13	Medición de longitud de raíz (Elaboración propia)	43
14	Mini tubérculos Calibre 15. (Elaboración propia).	43
15	Instalaciones del invernadero donde se estableció el experimento de producción de semilla de papa en un sistema aeropónico. (Elaboración propia).	44

RESUMEN
EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA SOBRE LA TASA DE MULTIPLICACIÓN DE SEMILLA DE *Solanum tuberosum* L. EN UN SISTEMA AEROPÓNICO

María del Rocío Espinosa Cisneros ¹; Martín Rubí Arriaga ¹; Andrés González Huerta ¹

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, El Cerrillo Piedras Blancas Mpio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. Tel. (fax) 722 2-96-55-29 y 722 2-96-55-31. mrubia@uaemex.mx; agonzalezh@aemex.mx.

El trabajo se realizó en las instalaciones de la empresa PRH Agroservicios S.A. de R.L. con el objetivo de analizar cuatro soluciones nutritivas sobre la tasa de multiplicación de semilla prebásica de papa en un sistema aeropónico, bajo un diseño experimental completamente al azar, consideró cuatro tratamientos cada tratamiento fue una solución nutritiva, T1: Solución Ferrán, T2: Solución Steiner, T3: solución Haifa adaptada a hidroponía, T4: Solución Ferrán Adaptada, con ocho repeticiones por cada tratamiento; las repeticiones constaron de diez unidades de muestreo, cada una fue una planta. Se evaluaron las variables altura y diámetro de tallo y longitud de raíz, se registraron datos a los 20, 40 y 60 días después del trasplante, posterior a ello se realizó la primera de ocho cosechas que permitió el ciclo fenológico del cultivo. Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza, seguido de una comparación de medias de los tratamientos por la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) de Fisher y un análisis de correlación lineal simple, usando el paquete estadístico InfoStat. La Solución Ferrán superó estadísticamente al resto de las soluciones evaluadas por lo que se consolidó como la mejor opción para producción de minitubérculos de papa bajo condiciones de aeroponía en Metepec, Estado de México.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE NUTRITIVE SOLUTION ON THE SEED MULTIPLICATION RATE OF *Solanum tuberosum* L. IN AN AEROPONIC SYSTEM

María del Rocío Espinosa Cisneros ¹; Martín Rubí Arriaga ¹; Andrés González Huerta ¹

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, El Cerrillo Piedras Blancas Mpio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. Tel. (fax) 2-96-55-29 y 2-96-55-31. mrubia@uaemex.mx; agonzalezh@aemex.mx.

The work was carried out at the facilities of the company PRH Agroservicios S.A. de R.L with the objective of analyzing four nutrient solutions on the multiplication rate of prebasic potato seed in an aeroponic system, under a completely randomized experimental design, considering four treatments, each treatment was a nutrient solution, T1: Ferrán Solution, T2 : Steiner Solution, T3 Haifa solution adapted to hydroponics, T4: Adapted Ferrán Solution, with eight repetitions for each treatment, the repetitions consisted of ten sampling units, each one was a plant. The variables height and diameter of stem and root length were evaluated, data were recorded at 20, 40 and 60 days after transplanting, after which the first of eight harvests were carried out that allowed the phenological cycle of the crop. The data were analyzed by analysis of variance, followed by a comparison of treatment means by Fisher's Least Significant Difference (MSD) test and a simple linear correlation analysis, using the InfoStat statistical package. The Ferrán Solution statistically outperformed the rest of the solutions evaluated, which is why it was consolidated as the best option for the production of potato minitubers under aeroponic conditions in Metepec, State of Mexico

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un tubérculo rico en carbohidratos, recién cosechada cuenta con el 80% de agua y el 20% de materia seca conformada principalmente por almidón; contiene vitaminas C, B1, B6 y otros minerales como potasio, fósforo, magnesio, folato, ácido pantoténico, riboflavina y antioxidantes. El consumo de su fibra es benéfico para la salud, por lo que cumple con un papel importante en la dieta del humano (CONPAPA, 2017).

Actualmente, es el cuarto cultivo más importante a nivel nacional superado únicamente por el maíz, trigo y arroz (FAO, 2022).

En el año 2022 México obtuvo el lugar número 32 en producción mundial de papa con 1,878,976 toneladas y un consumo *percapita* de 15.3 kg; Sonora, Sinaloa son los dos principales estados en producción de este tubérculo, el Estado de México se posiciona en el tercer lugar con una producción de 161,833 toneladas (Panorama Agroalimentario, 2023).

La semilla es el insumo más importante en todo el ciclo de cultivo, donde la disponibilidad de material sano y de buena calidad se convierte en uno de los importantes factores que limitan la producción de este tubérculo. Ranalli *et al.* (1994; Mateus-Rodríguez *et al.*, 2013), señalaron que el potencial genético de una variedad o clon se conserva con tubérculos, semillas libres de virus, hongos y bacterias, dado que la calidad fitosanitaria repercute en el rendimiento del cultivo, por lo que para el caso de papa la producción de semilla prebásica cobra particular importancia.

Las principales variedades comerciales de papa de las que se ha generado semilla certificada en México han sido Alpha, Atlantic, Giant, Mondial, Fianna, Caesar, Vivaldi, Felsiana y de una cantidad reducida de variedades mexicanas como Norteña, Montserrat, Zafiro, Malinche y Tollocan (INIFAP, 2010).

La principal problemática que enfrentan los productores en el cultivo de papa, es adquirir semilla certificada, por la baja disponibilidad y el elevado costo, por lo que optan por producir su propia semilla, que de no hacerlo bajo los procedimientos adecuados puede contener patógenos con lo que involuntariamente diseminan plagas y enfermedades que se transmiten a través de la semilla de mala calidad para el próximo ciclo, lo que refleja en menor densidad de población y rendimiento por planta, afectando al productor en inversión para agroquímicos además de la erosión del suelo y el daño a la salud y al ambiente.

Con la aeroponía, que consiste en producir cultivos al suspender las raíces de las plantas en el aire y proporcionar una solución nutritiva dispersada a través de boquillas de atomización, se puede obtener semilla prebásica de alta calidad ya que al no estar en contacto con el suelo y al ser planta de origen *in vitro* libre de patógenos la posibilidad de aumentar el rendimiento y calidad es mayor, para beneficio del productor y del consumidor (Caliskan *et al.*, 2020).

El cultivo en aeroponía es una tecnología alternativa para la adaptación efectiva a las áreas del mundo donde el suelo y el agua están en condiciones críticas (Cuellar-Bonilla, 2014; Urrestarazu, 2015), este enfoque utiliza cantidades relativamente menores de agua por unidad de área plantada, convirtiéndolo en una forma segura

o ecológica de cultivar plantas (Ritter *et al.*, 2001; Farran y Mingo-castel, 2006; Calori *et al.*, 2018) así como para controlar la rizosfera (Buckseth *et al.*, 2016), donde las raíces pueden nutrirse rápidamente en condiciones controladas, como uniforme concentración de nutrientes, pH, CE (conductividad Eléctrica), Humedad, tiempo de atomización, intervalo de atomización, frecuencia de atomización, oxígeno, disponibilidad, temperatura e intensidad de luz (Lakhiar *et al.*, 2018). Según Chandra *et al.*, (2014), en comparación con las plantas cultivadas en el suelo, el sistema aeropónico genera mayor rendimiento y mejora propiedades fenológicas, concentraciones de flavonoides y antioxidantes (Martínez-Peñaloza, 2013).

Las soluciones nutritivas están formadas por el agua de riego junto con iones disueltos procedentes de la disolución de abonos empleados para la formulación de dicha solución en donde se encuentran disueltos los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas en una proporción adecuada, dichas soluciones deberán estar compuestas por elementos esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre requeridas con mayor porcentaje, también la planta requiere microelementos como hierro, zinc, manganeso, cobre, boro y molibdeno (Baixauli y Aguilar, 2002).

Una limitación de la aeroponía es la determinación de la solución nutritiva adecuada que corresponda a los requerimientos nutrimentales de los cultivos (Emin-Caliskan *et al.*, 2020), en particular para el caso de papa se reportan varias, pero a la fecha no se ha definido la que mejor resultado aporta. Por lo anteriormente expuesto se ha establecido una línea de investigación orientada a determinar la integración de

una solución nutritiva para la producción de minitubérculos de papa bajo condiciones de aeroponía.

II. OBJETIVOS

2.1 General

Comparar el efecto de cuatro soluciones nutritivas sobre la tasa de multiplicación y calibre de semilla prebásica de papa variedad Fianna, cultivada en un sistema de producción aeropónico.

2.2 Particulares

-Determinar el efecto de la solución nutritiva Ferrán sobre la tasa de producción y calibre de semilla prebásica.

- Determinar el efecto de la solución nutritiva Ferrán adaptada sobre la tasa de producción y calibre de semilla prebásica.

- Determinar el efecto de la solución nutritiva Steiner sobre la tasa de producción y calibre de la semilla prebásica.

- Determinar el efecto de la solución nutritiva Haifa adaptada a hidroponía, sobre la tasa de producción y calibre de semilla prebásica.

- Identificar la solución nutritiva que ejerce el mejor efecto sobre el vigor, la producción y calidad de mini tubérculos.

III. HIPOTESIS

La integración de la solución nutritiva ejerce un efecto directo sobre el crecimiento y desarrollo de la planta, así como en la formación y número de minitubérculos.

IV. JUSTIFICACIÓN

La papa es un alimento básico debido a su alto valor energético y nutritivo. A nivel mundial se siembran más de 18 millones de ha, por lo que ocupa el tercer lugar en importancia para la alimentación humana. En el año 2019 se establecieron 60 mil ha para consumo, con un rendimiento de 30.5 t ha⁻¹ y una producción anual de 1,784,000 t (SIAP,2020).

Uno de los problemas que limita significativamente la producción de esta especie es el contar con semilla de buena calidad que garantice una adecuada producción. Los productores cuentan con diferentes metodologías para obtener semilla. Para la producción de minitubérculos actualmente la aeroponía se consolida como una de las alternativas más viables y con mejores resultados ya que en este sistema se asegura una producción con estándares altos de calidad y sanidad, así como el ahorro de agua y energía por módulo de producción. Esta metodología optimiza el acceso de oxígeno, agua y nutrientes para un crecimiento exitoso y previene el desarrollo de patógenos.

Otazú (2015), señala que la técnica aeropónica, generalmente utilizada para la producción de semilla de papa, permite obtener semilla que cumpla con los estándares de sanidad, adecuado estado fisiológico y pureza genética, por lo que se consolida como una alternativa para incrementar la producción dentro de un invernadero, con ella se pueden reducir costos de producción de la semilla con la calidad deseada.

Una diferencia importante entre la aeroponía y la hidroponía es la manera de aplicar la solución nutritiva: en la primera se utiliza un método de niebla que ayuda a que las raíces puedan absorber de manera directa todos los nutrientes (Urretarazu, 2015).

Para el desarrollo de esta metodología se requieren soluciones nutritivas, pero a la fecha no existe una óptima, especialmente para la producción de minitubérculos de papa y menos aún por variedad específica, dado que las exigencias nutrimentales difieren entre y dentro de cada variedad a lo largo de las etapas fenológicas, por lo que la presente investigación pretende evaluar cuatro soluciones nutritivas para la producción de minitubérculos de papa bajo un sistema aeropónico para identificar la que brinde la mejor tasa de multiplicación y calidad de los minitubérculos tanto agronómica como económicamente.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Origen de la papa

Existe abundante evidencia arqueológica que demuestra que la papa ha sido cultivada en la región Andina de América del Sur desde tiempos muy antiguos. Se considera que el centro de origen está en las tierras altas del sur de Perú, en una zona comprendida entre El Cuzco y los alrededores del lago Titicaca. De ahí se difundió por el sur hacia Bolivia, Argentina y Chile; y por el norte hacia Ecuador, Colombia, Venezuela, Guatemala y México (INIFAP, 2010).

5.2 Importancia de la especie

La papa es el cuarto cultivo alimenticio más importante del mundo en términos de consumo humano, después del arroz (*Oriza sativa* L.) y del trigo (*Triticum aestivum* L.). Aproximadamente 1.4 mil millones de personas consumen papa como alimento básico, y la producción total del cultivo sobrepasa los 300 millones de t métricas. La papa es esencial en términos de seguridad alimentaria frente al crecimiento de la población y al aumento de las tasas globales de hambre. Por ejemplo, China, el más grande consumidor de papas, confía que el 50 % de aumento en la producción de alimentos que requerirá para satisfacer su demanda en los próximos 20 años provendrá de esta especie. La papa, primer alimento moderno de preparación rápida, es rica en energía, nutritiva, fácil de prosperar en parcelas pequeñas, barata para comprar y lista para cocinarse sin costoso procesamiento. El banco de germoplasma del Centro Internacional de la Papa (CIP) mantiene la colección más

grande de este tubérculo del mundo, incluyendo más de 7,000 accesiones de variedades nativas, silvestres y mejoradas (CIP, 2012).

5.3 Producción a nivel mundial

La papa, cuyos orígenes genéticos se encuentran en América del Sur, se cultiva en más de 20 millones de ha en 150 países y en 2020 su producción mundial total ascendía a 359 millones de t.

Las papas representan el tercer cultivo alimenticio más importante del mundo y las personas las consumen de forma regular. También generan ingresos para los productores en pequeña escala, constituyen una fuente de hidratos de carbono saludables, con bajo contenido de grasa y alto contenido de fibra, son ricas en antioxidantes y nutrientes y producen menos emisiones de gases de efecto invernadero que otros cultivos importantes.

Las papas podrían contribuir aún más a la seguridad alimentaria mundial y en los próximos 10 años se espera una duplicación en su producción total (QU Dongyu, 2022).

5.4 Variedad Fianna

Con origen en Holanda, esta variedad se caracteriza por los tubérculos ovalados y alargados, calibre grande a muy grande. Su follaje varía de media a alta, flor blanca y brote azul; presenta buena resistencia al virus del enrollamiento de la hoja de la papa (PLRV) y a la sarna común. Tiene buen comportamiento ante *Phytophthora infestans* y al Virus PVY. Su contenido de materia seca es alto y tiene

amplia aceptación para su comercialización como papas fritas y en fresco (SNICS, 2009).

5.5 Producción de semilla prebásica

La semilla determina de manera significativa el rendimiento del cultivo en papa, y también es utilizado para propagar y conservar variedades mejoradas y nativas, por lo que es un insumo estratégico para conservar la soberanía alimentaria y la diversidad genética de los países que la producen.

La producción de semilla de papa parte de la categoría prebásica, que enmarca todo un proceso desde etapas de cultivo *in vitro* en laboratorio. A partir de ésta se realiza su multiplicación en el campo para obtener semilla básica y posteriormente se generan otras categorías. La aeroponía, como técnica de producción, presenta ventajas sobre el uso de sustratos, ya que permite cultivos en zonas donde los suelos no son aptos para la agricultura. El cultivo sin suelo permite eliminar la rotación de cultivos o la interrupción de la producción ocasionada por condiciones climatológicas, entre otros factores. También se considera una ventaja la utilización de una menor área de cultivo cuando se utiliza una mayor densidad por unidad de superficie (Mateus y Chuquillanqui, 2008).

Para garantizar producción, productividad, pureza varietal y sanidad del cultivo de papa se requiere semilla de óptima calidad. Frente a los bajos rendimientos de producción de semilla obtenidos en el sistema semi hidropónico, el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INAIP) y CIP, han emprendido

investigaciones para mejorar la productividad y abaratar los costos de producción de tubérculos-semilla categoría prebásica utilizando la técnica de aeroponía.

En este sistema se presenta un crecimiento exuberante del sistema radicular, los estolones sufren un incremento en su longitud y en grosor, siendo su longitud igual a la altura del módulo de producción. La producción de minitubérculos se incrementa durante el desarrollo del cultivo, alcanzando un pico de producción, ya que este sistema permite realizar varias cosechas hasta que las plantas cumplan con su ciclo biológico; una vez que el ciclo termina el calibre de cosecha ideal disminuye y se cosechan minitubérculos más pequeños, pero, aun así, éstos son válidos para la plantación en campo con el fin de incrementar los rendimientos (Arias, 2009).

5.6 Calidad de semilla

La calidad de una semilla está determinada por su sanidad, estado fisiológico, y purzas física y genética, entre otros. En papas, los dos primeros son los más importantes (Otazú, 2010).

La baja sanidad de la semilla de papa se explica principalmente por su degeneración, que es la pérdida de rendimiento o calidad debido a la acumulación de patógenos o plagas en los tubérculos, en ciclos sucesivos de propagación vegetativa.

La siembra de semilla sana es un factor clave para maximizar la producción tanto en consumo en fresco como para procesamiento. La Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE-ONU), ha elaborado un estándar de calidad para referencia internacional de la semilla de papa con el propósito de ayudar a los

productores. El estándar presenta una terminología común y requisitos mínimos para la certificación de semilla de alta calidad para el comercio internacional. Esto cubre:

- Identidad y pureza varietal
- Genealogía y trazabilidad
- Enfermedades y plagas
- Calidad y fisiología del tubérculo externo
- Medición y etiquetado

Se trata de un estándar de comercialización que establece normas armonizadas de los requisitos de calidad para la semilla de papa. Suplementa y apoya otros estándares fitosanitarios internacionales. El estándar define los requisitos mínimos en el punto de control de exportación y prescribe tolerancias para las enfermedades, defectos y fallas de cultivo, lote o cosecha sucesiva ([CEPE-ONU, 2014](#)).

5.7 Solución nutritiva

La solución nutritiva se compone de una mezcla de agua y fertilizantes químicos, que se suministran a la planta como fuente de alimentos para cubrir sus necesidades fisiológicas. En ésta se añade el agua y los nutrientes minerales necesarios para su óptimo desarrollo. Como se debe suponer, la solución nutritiva estará compuesta por iones (iones y cationes) en disolución (Arias, 2009). Su composición variará dependiendo de la etapa de crecimiento de las plantas en la que ésta se aplique. Como cada cultivo tiene un requerimiento óptimo de nutrientes,

cada cultivo de papa puede requerir diferente concentración (Otazu, 2015). La absorción de nutrientes es un fenómeno universal, por lo que resulta imprescindible saber cuántos días va a estar activo este proceso para completar los requerimientos que harán posible la obtención de mejores cosechas.

Los cultivos sin suelo pueden dar o establecer cualquier relación de iones y cualquier concentración total de sales, siempre que no supere los límites de precipitación para ciertas combinaciones de iones, Así, la selección de la concentración de una solución nutritiva deber ser que el agua y los iones totales sean absorbidos por la planta en la misma proporción en la cual están presentes en la solución (Steiner, 1968).

Steiner (1968) Desarrolló un método para calcular una fórmula para la composición de una solución nutritiva, la cual satisface ciertos requerimientos, indicando que la composición y concentración de una solución nutritiva depende de la clase de cultivo de la fase de desarrollo, del medio ambiente, y del tipo de hidroponía, entre otros.

Steiner (1968,1984) elaboró una solución nutritiva universal que se distingue por sus relaciones mutuas entre iones y cationes, expresadas en por ciento del total de Mm-l-1. Este autor indica que el uso de su solución nutritiva universal demanda únicamente que se determine la presión osmótica requerida para un cultivo en particular en una cierta época del año. Las relaciones mutuas entre iones en la solución nutritiva universal de Steiner en porcentaje del total de Mm-L-1 es de 60:5:35 para NO₃⁻, H₂PO₄⁻, y SO₄⁻, respectivamente, así como de 35:45:20 para K⁺, CA₂⁺, Mg₂⁺, en el mismo orden.

No todos los fertilizantes usados en la agricultura convencional son adecuados para la preparación de soluciones nutritivas para la aeroponía. Se necesitan fertilizantes que sean de rápida y alta solubilidad en el agua y que contengan niveles de residuos insolubles, metales pesados contaminantes u otros componentes tóxicos para las plantas, por ejemplo: cloruros, menores a la tolerancia máxima de la normativa vigente en cada país.

Algunos fertilizantes contribuyen en menor o mayor grado con la alcalinidad o acidez de la solución, por lo cual es conveniente contar con esta información.

Entre los fertilizantes acidificantes están:

- Fosfato de amonio
- Sulfato de amonio
- Urea
- Nitrato de amonio

Y entre los fertilizantes neutros están:

- Cloruro de potasio
- Nitrato de potasio
- Sulfato de potasio

La selección de los fertilizantes también depende de su disponibilidad y costo (CIP, 2015).

5.8 Fuente de nutrientes

Cada cultivar de papa puede requerir diferente solución nutritiva. Esto también depende de la calidad química del agua y de los nutrientes usados para la solución nutritiva. No debemos tener una CE mayor a 2.0 mS/cm si queremos evitar problemas de Fitotoxicidad.

El cultivo de papa demanda grandes cantidades de nutrientes, principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) durante todo su ciclo (White *et al.*, 2007) y, aunque es una de las hortalizas de mayor rentabilidad, también tiene altos costos de producción asociados principalmente al costo de la semilla y a la excesiva aplicación de insumos (pesticidas, agua y fertilizantes).

La fertilización tiene la función de suministrar nutrientes a los cultivos que no son aportados de manera natural por el suelo. Para una buena producción en términos de cantidad, calidad y sostenibilidad usualmente los macronutrientes NPK, son aplicados al cultivo de papa cuando las reservas del suelo son limitadas. (2011).

5.9 La Aeroponía

La aeroponía se deriva del latín: “aero” (aire) y “ponic” (trabajo) (Farran y Mingo-Castel, 2006). Es una tecnología accesible ya que trabaja con un sistema parecido a la hidroponía; el equipamiento consiste en un sistema de recirculación que permite la oxigenación y la absorción directa con un equipo de bombeo que es el que alimenta a las plantas según se guste. En comparación con un cultivo tradicional cosechar una hortaliza puede tomar 40 días: mediante la aeroponía se reduce a

solo 28 días y podrían obtenerse más de 13 cosechas durante el ciclo de cultivo (Bonilla, 2012).

El sistema aeropónico es una de las técnicas de cultivo sin suelo donde la planta crece en el aire con ayuda de un soporte artificial el cual sustituye al sustrato, por lo que su sistema radicular queda suspendido en el aire dentro de un módulo que nos aporta oscuridad con un sistema automatizado de riego que contiene nutrientes para su crecimiento y desarrollo, así mismo el crecimiento de tallos, follajes y flores se desarrolla por la parte exterior del módulo (Imran Ali Lakhia *et al.*, 2018).

La aeroponía podría reemplazar a la hidroponía en la producción de todo tipo de cultivos alrededor del mundo, sobre todo pensando en el cuidado del medio ambiente, teniendo una tendencia de crecimiento más rápido que las plantas en el suelo o en tiestos y disminuye costos, ya que los cultivos no son invadidos por plagas y enfermedades que se presentan en el suelo (Peñaloza, 2013).

La técnica de aeroponía es una tecnología relativamente nueva, especialmente para la producción de semilla de papa; algunas características de ésta son:

- La producción de semilla de papa puede ser incrementada en el invernadero.
- Las diferentes variedades de papa responden diferencialmente en aeroponía.
- Los cultivares tipo Tuberosum tienden a producir menos que los cultivares que tienen genes de Andígena. Esto también se observa cuando se desarrollan en sustrato.
- El factor clima es particularmente importante en aeroponía.

- Las cosechas son múltiples y secuenciales.
- El periodo de crecimiento de las plantas se alarga en 1 a 2 meses.
- La semilla proveniente de aeroponía produce igual o más que la semilla convencional.
- La inversión inicial puede recuperarse rápidamente.
- Con aeroponía se puede aumentar significativamente el ingreso o reducir los costos de producción de la semilla de calidad de papa (Otazú, 2010).

El cultivo en un sistema aeropónico es seguro y sustentable para producir papas, y la multiplicación de semilla en este sistema tiene ventajas sobre otras técnicas de producción. Este sistema tiene la capacidad de conservar agua utilizando la recirculación de la solución con nutrientes utilizando menos insumos (Ritter *et al.*, 2001; Farrán *et al.*, 2006).

En este sistema también se beneficia la raíz, al tener mayor aireación, ya que la planta se encuentra totalmente suspendida en el aire y el sistema radicular tiene un buen acceso a las concentraciones de dióxido de carbono para la fotosíntesis, en comparación con las plantas hidropónicas (Ritter *et al.*, 2001). Esta técnica representa a uno de los métodos de multiplicación de semillas más rápido y a través de él es más fácil dar seguimiento a la disponibilidad de pH, conductividad eléctrica y disponibilidad de otros nutrientes que requiere la planta de acuerdo con su fase fisiológica.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Localización del experimento

El trabajo experimental se desarrolló dentro de las instalaciones de la empresa PRH AGROSERVICIOS S.A., de R.L. (Fig. 1), ubicada en Metepec, Estado de México, a $19^{\circ}16'10.8444''$ N, y $99^{\circ} 36' 0.9432''$ W. En esta zona se tienen temperaturas promedio de 20°C durante el día y 16°C durante la noche, con una humedad relativa del 60%. Contando con invernaderos y estructuras para sistema aeropónico como lo muestran las figuras 2 y 3



Figura 1. Ubicación de invernaderos (Elaboración propia).



Figura 2. Instalaciones de la Empresa (Elaboración propia).



Figura 3. Producción de minitubérculos de papa en un sistema aerónico.
(Elaboración propia).

6.2 Manejo del experimento

6.2.1 Adaptación

Las plántulas pasaron por un proceso de adaptación antes de ser trasplantadas a los módulos aeropónicos, como se muestra en la figura 4 el cual tuvo una duración de 10 días en un cuarto de burbujeo, la figura 5 muestra el sistema de burbujeo, posteriormente en la figura 6 se puede observa el trasplante a módulo el día 21 de mayo de 2021.



Figura 4. Proceso de adaptación de las plántulas. (Elaboración propia).



Figura 5. Sistema de burbujeo en cuarto de adaptación. (Elaboración propia).



Figura 6. Transplante a módulo aeropónico. (Elaboración propia).

6.2.2 Requerimientos nutricionales

En el Cuadro 1 se muestra el intervalo de variación en la conductividad eléctrica que fue utilizado durante este estudio (de 0.5 a 2.0 ds-m), En la figura 7 podemos observar la etapa vegetativa del cultivo en el cual tiene una C.E de 0.8 a 1.0 ds-m, la figura 8 muestra el inicio de la tuberización teniendo una C.E de 1.2 ds-m, en la figura 9 se observa el llenado del minitubérculo, en esta etapa la C.E es de 1.5 a 1.8 ds-m, por último la figura 10 muestra el inicio de cosecha, donde se mantiene una C.E de 1.8 a 2.0 ds-m hasta el término de la producción, manteniendo un pH entre 5.5 y 6.5 a lo largo del ciclo de producción; ambas variables fueron medidas por un potenciómetro ORIÓN STAR A211. Del mismo modo se realizaron aplicaciones de micronutrientes, fungicidas e insecticidas para prevenir problemas fitosanitarios y mantener condiciones apropiadas para el crecimiento y desarrollo de la planta.

Cuadro 1. Conductividad eléctrica utilizada durante el estudio.

Semana	Conductividad eléctrica (ds-m)	Fecha	Etapa
1	(Día 1-5) agua corriente, 0.5	21 de mayo, 2021	Adaptación a módulo
2	0.8	28 de mayo, 2021	Vegetativo
3	0.8	4 de junio, 2021	Vegetativo
4	1.0	11 de junio, 2021	Vegetativo
5	1.0	18 de junio, 2021	Vegetativo

6	1.2	25 de junio, 2021	Inicio de tuberización
7	1.2	2 de julio, 2021	Tuberización
8	1.5	9 de julio, 2021	Llenado de mini tubérculo
9	1.5	16 de julio, 2021	Llenado de mini tubérculo
10	1.7	23 de julio, 2021	Llenado de mini tubérculo
11	1.8	30 de julio, 2021	Llenado de mini tubérculo / Inicio de cosecha
12	2.0	6 de agosto, 2021	Llenado de mini tubérculo / Cosecha

13	2.0	13 de agosto, 2021	Llenado de mini tubérculo / Cosecha
14	2.0	20 de agosto, 2021	Llenado de mini tubérculo / Cosecha
15	2.0	27 de agosto, 2021	Llenado de mini tubérculo / Cosecha
16	2.0	3 de septiembre, 2021	Llenado de mini tubérculo / Cosecha



Figura 7. Etapa vegetativa en el cual tiene una C.E de 0.8 a 1.0 ds-m(Elaboración propia).



Figura 8. Inicio de la tuberización teniendo una C.E de 1.2 ds-m (Elaboración propia).



Figura 9. Llenado de minitubérculo en esta etapa la C.E es de 1.5 a 1.8 ds-m (Elaboración propia).



Figura 10. Cosecha de minituberculos (Elaboración propia).

El registro de datos se realizó en las etapas de plántula, al trasplantar, así como a los 20, 45, y 60 días del trasplante. Se midió altura, diámetro del tallo, largo de raíz, así como número de minitubérculos de calibre 15 mm en cada planta, por cosecha, por ser el más rentable para la empresa.

Requerimientos nutrimentales para integración de soluciones nutritivas

Requerimientos nutricionales para integrar la solución Steiner

En el Cuadro 2 se presentan los requerimientos nutricionales para integrar la solución Steiner.

Cuadro 2. Requerimientos nutrimentales para integrar la Solución Steiner

<i>CE</i> (dS/m)	<i>NO3</i> (meq/l)	<i>H2PO4</i> (meq/l)	<i>SO4</i> (meq/l)	<i>K</i> (meq/l)	<i>Ca</i> (meq/l)	<i>Mg</i> (meq/l)	<i>NH4</i> (meq/l)
0,5	3	0,25	1,75	1,75	2,25	1	0
0,8	4,8	0,4	2,8	2,8	3,6	1,6	0
1	6	0,5	3,5	3,5	4,5	2	0
1,2	7,2	0,6	4,2	4,2	5,4	2,4	0
1,5	9	0,75	5,25	5,25	6,75	3	0
1,7	10,2	0,85	5,95	5,95	7,65	3,4	0
1,8	10,8	0,9	6,3	6,3	8,1	3,6	0
2	12	1	7	7	9	4	0

Requerimientos nutricionales para integrar la solución Ferrán

En el Cuadro 3 se presentan los requerimientos nutrimentales para integrar la solución Ferrán.

Cuadro 3. Requerimientos nutrimentales para integrar la solución Ferrán.

CE (dS/m)	NO₃m (meq/l)	H₂PO₄ (meq/l)	SO₄ (meq/l)	K (meq/l)	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	NH₄ (meq/l)
0.5	2.4688	1.3750	0.4688	1.5000	0.9688	0.4688	1.3750
0.8	3.9500	2.2000	0.7500	2.4000	1.5500	0.7500	2.2000
1.0	4.9375	2.7500	0.9375	3.0000	1.9375	0.9375	2.7500
1.2	5.9250	3.3000	1.1250	3.6000	2.3250	1.1250	3.3000
1.5	7.4063	4.1250	1.4063	4.5000	2.9063	1.4063	4.1250
1.7	8.3938	4.6750	1.5938	5.1000	3.2938	1.5938	4.6750
1.8	8.8875	4.9500	1.6875	5.4000	3.4875	1.6875	4.9500
2.0	9.8750	5.5000	1.8750	6.0000	3.8750	1.8750	5.5000

Requerimientos nutricionales para integrar la solución Haifa

En el Cuadro 4 se presentan los requerimientos nutrimentales para integrar la solución Haifa.

Cuadro 4. Requerimientos nutricionales para la solución Haifa.

CE (dS/m) real	CE (dS/m) requ	NO₃ (meq/l))	H₂P O₄ (meq /l)	SO₄ (meq/ l)	K (meq/l))	Ca (meq/l))	Mg (meq/l))	NH₄ (meq/l)
0,5	0,4	2,30	0,99	0,09	4,49	0,09	0,09	0,57
0,8	0,64	3,67	1,59	0,15	7,18	0,15	0,15	0,92
1	0,8	4,59	1,99	0,18	8,97	0,18	0,18	1,15
1,2	0,96	5,51	2,38	0,22	10,77	0,22	0,22	1,38
1,5	1,2	6,89	2,98	0,28	13,46	0,28	0,28	1,72
1,7		7,80	3,38	0,31	15,26	0,31	0,31	1,95
1,8	1,44	8,26	3,58	0,33	16,15	0,33	0,33	2,07
2	1,6	9,18	3,97	0,37	17,95	0,37	0,37	2,30

Requerimientos nutricionales para integrar la solución Ferrán Adaptada

En el Cuadro 5 se presentan los requerimientos nutrimentales para integrar la solución Ferrán adaptada.

Cuadro 5. Requerimientos nutrimentales para integrar la Solución Ferrán

Adaptada.

CE (dS/m)	NO3 (meq /l)	H2PO4 (meq/l)	SO4 (meq /l)	K (meq /l)	Ca (meq /l)	Mg (meq /l)	NH4 (meq /l)	aniones (meq/l)	catione s (meq/l)
0,5	2,47	1,38	0,47	1,50	0,97	0,47	1,38	4,31	4,31
0,8	3,95	2,20	0,75	2,40	1,55	0,75	2,20	6,90	6,90
1	4,94	2,75	0,94	3,00	1,94	0,94	2,75	8,63	8,63
1,2	5,93	3,30	1,13	3,60	2,33	1,13	3,30	10,35	10,35
1,5	4,94	5,98	2,02	5,02	3,42	1,75	2,75	12,94	12,94
1,7	5,60	6,77	2,29	5,68	3,88	1,98	3,12	14,66	14,66
1,8	5,93	7,17	2,43	6,02	4,11	2,10	3,30	15,53	15,53
2	6,58	7,97	2,70	6,69	4,56	2,33	3,67	17,25	17,25

6.2.3 Variables evaluadas

Las variables registradas en cuanto a vigor de planta fueron:

Altura de tallo, que se registró con la ayuda de una cinta métrica y regla de 30 cm (Fig. 11).

Diámetro del tallo, se registró con el apoyo de un vernier digital marca trupper (Fig.12).

Longitud de raíz, cuantificada con una cinta métrica y regla de 30 cm (Fig.13).

Para productividad de la planta se registró el número total de minitubérculos por planta, tanto para calibre 15 como para menores a éste.



Figura 11. Medición de altura de tallo. (Elaboración propia).



Figura 12. Medición de diámetro del tallo. (Elaboración propia)

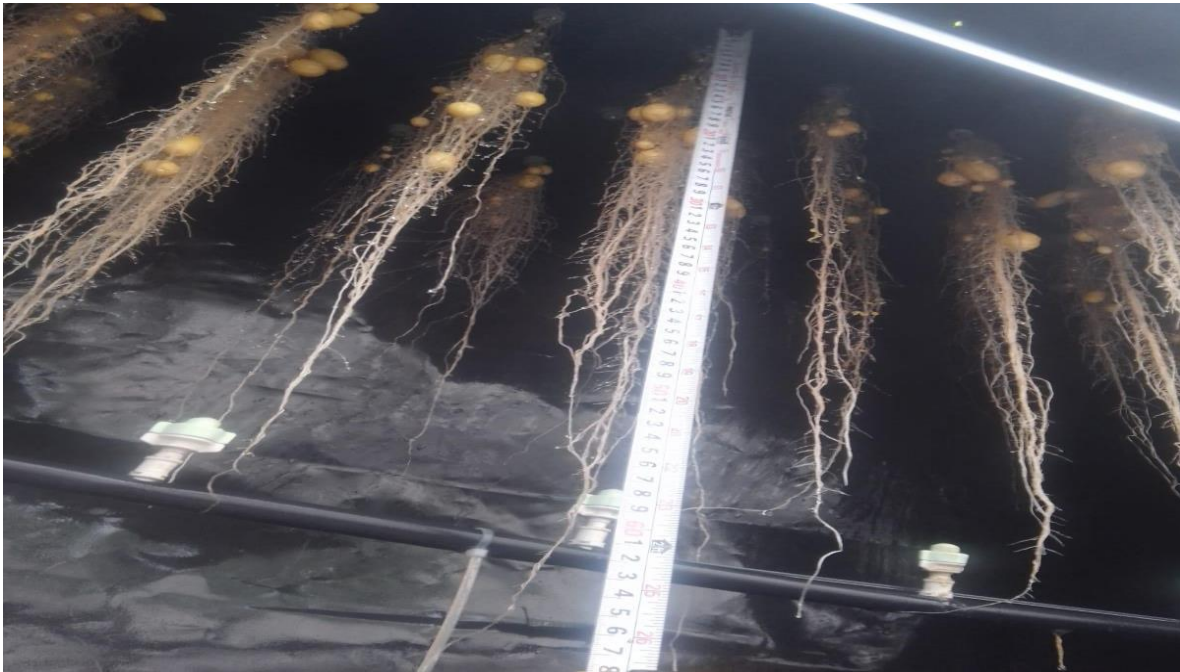


Figura 13. Medición de longitud de raíz. (Elaboración propia)



Fig. 14. Mini tubérculos Calibre 15. (Elaboración propia).

6.2.4 Diseño experimental y tamaño de la unidad de muestreo

El trabajo se estableció en condiciones de invernadero bajo un diseño experimental completamente al azar usando cuatro tratamientos (soluciones nutritivas) y ocho repeticiones por cada tratamiento; las repeticiones constaron de diez unidades de muestreo, cada una representada por una planta.

En la figura 15 se muestra el experimento que fue realizado al interior de un invernadero de 9.0 m de longitud por 6.0 m de ancho, altura de 3.60 m, con una malla sombra de 70%, con 30% luz. Este invernadero no tiene control automático de la temperatura. Para el establecimiento del experimento se contó con cuatro módulos aeropónicos de 3.0 m de longitud y 1.5 m de anchura cada uno. El riego está controlado de manera computarizada, y en cada módulo se aplicó cada una de las soluciones nutritivas referidas.



Figura 15. Instalaciones del invernadero donde se estableció el experimento de producción de semilla de papa en un sistema aeropónico. (Elaboración propia)

6.2.5 Cosecha de minitubérculos

La cosecha dio inicio el 30 de julio del 2021, cuando el cultivo alcanzo la madurez fisiológica, realizándose cada ocho días hasta completar el ciclo, lo que resulto en un total de seis fechas de cosecha de minituberculos, estableciéndose dos categorías: los de calibre 15 y los de calibre menor a este.

6.2.6 Análisis de datos

Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza, seguido de una comparación de medias de los tratamientos mediante la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) de Fisher y un análisis de correlación lineal simple, usando el paquete estadístico InfoStat, liberado por la Universidad Nacional de Córdoba, de Argentina, a través de su Facultad de Ciencias Agropecuarias; la versión utilizada fue 2017.

VII. RESULTADOS

7.1 Número promedio de mini tubérculos en seis cosechas (X1)

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>	
X1	32	0.41	0.13	14.94	
<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	33.00	10	3.30	1.46	0.2238
Trat	11.19	3	3.73	1.65	0.2090
Rep	21.82	7	3.12	1.38	0.2665
Error	47.57	21	2.27		
Total	80.57	31			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=1.56493

Error: 2.2651 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
3	11.02	8	0.53	A
2	9.96	8	0.53	A B
1	9.93	8	0.53	A B
4	9.39	8	0.53	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Para promedio de seis cosechas se observó que los efectos entre tratamientos no

fueron significativos en el análisis de varianza, pero al aplicar la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) de Fisher se puede notar que el tratamiento 3, conformado por la solución Ferrán, causó un incremento promedio de 2 minitubérculos con relación a la solución Haifa modificada a hidroponía, que fue la que presentó el menor promedio.

Número promedio de minitubérculos en 10 plantas cosechadas

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>	
X2	32	0.55	0.33	13.99	
<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	20.40	10	2.04	2.53	0.0349
Trat	12.92	3	4.31	5.35	0.0068
Rep	7.48	7	1.07	1.33	0.2868
Error	16.91	21	0.81		
Total	37.31	31			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.93304

Error: 0.8052 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
3	7.38	8	0.32 A
2	6.58	8	0.32 A B
1	5.90	8	0.32 B
4	5.79	8	0.32 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En el análisis de varianza se puede observar que los efectos entre tratamientos fueron estadísticamente significativos ($p=0.01$) para esta característica. Al aplicar la prueba de la DMS de Fisher se puede destacar que los tratamientos 3 y 2, correspondientes a las soluciones Ferrán y Ferrán modificada presentaron los promedios aritméticos más altos; ambos son estadísticamente iguales pero el primero superó significativamente a las soluciones 1 y 4, identificadas como Steiner y Haifa, respectivamente.

7.2 Altura de Tallo al Trasplante

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
X3	32	0.49	0.24	22.14

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	51.89	10	5.19	2.00	0.0868
Trat	17.98	3	5.99	2.31	0.1055
Rep	33.90	7	4.84	1.87	0.1266
Error	54.46	21	2.59		
Total	106.34	31			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=1.67443

Error: 2.5931 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
3	8.11	8	0.57 A

1	7.67	8	0.57	AB
4	7.23	8	0.57	AB
<u>2</u>	<u>6.09</u>	<u>8</u>	<u>0.57</u>	<u>B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En el análisis de varianza no se apreciaron diferencias estadísticas entre tratamientos para esta variable, pero al aplicar la DMS de Fisher se observó que las soluciones identificadas como 3, 1 y 4, correspondientes a Ferrán, Steiner y Haifa respectivamente causaron el mismo efecto en la altura de plántula promedio al momento de trasplantar; sólo Ferrán fue estadísticamente diferente de la solución 2, identificada como Ferrán adaptada.

7.2.1 Altura de tallo 20 días después del trasplante

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>X4</u>	<u>32</u>	<u>0.49</u>	<u>0.25</u>	<u>13.35</u>

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	9.94	10	0.99	2.03	0.0821
Trat	6.62	3	2.21	4.51	0.0136
Rep	3.32	7	0.47	0.97	0.4773
Error	10.27	21	0.49		
<u>Total</u>	<u>20.20</u>	<u>31</u>			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.72703

Error: 0.4889 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
1	5.89	8	0.25 A
3	5.38	8	0.25 A B
4	5.01	8	0.25 B
<u>2</u>	<u>4.67</u>	<u>8</u>	<u>0.25 B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

20 días después del trasplante se apreció que en el análisis de varianza hubo significancia estadística entre tratamientos ($p=0.05$); al aplicar la prueba de la DMS de Fisher se observó que las Solución Steiner (Trat 1) y Ferrán (Trat 3) originaron el mismo efecto sobre esta variable y sólo la primera superó estadísticamente a las soluciones Haifa y Ferrán adaptada.

7.2.2 Altura de tallo a los 47 días del trasplante

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>X5</u>	<u>32</u>	<u>0.81</u>	<u>0.73</u>	<u>15.46</u>

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	581.72	10	58.17	9.24	<0.0001
Trat	494.12	3	164.71	26.15	<0.0001
Rep	87.60	7	12.51	1.99	0.1056
Error	132.26	21	6.30		
<u>Total</u>	<u>713.98</u>	<u>31</u>			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.60953

Error: 6.2982 gl: 21

Trat	Medias	n	E.E.
1	21.62	8	0.89 A
2	17.96	8	0.89 B
4	14.19	8	0.89 C
3	11.18	8	0.89 D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En esta característica, el análisis de varianza permitió detectar diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.01$) a los 47 días del trasplante. Estas diferencias están relacionadas con el mayor efecto positivo sobre altura del tallo que originó la Solución Steiner (Trat 1) en comparación con el originado por las otras soluciones; la primera superó significativamente a Ferrán, Ferrán modificada y Haifa.

7.2.3. Altura de tallo a los 60 días del trasplante

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
X6	32	0.74	0.61	14.38

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	828.74	10	82.87	5.87	0.0003
Trat	664.56	3	221.52	15.68	<0.0001
Rep	164.18	7	23.45	1.66	0.1735
Error	296.68	21	14.13		

Total	1125.42	31
-------	---------	----

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=3.90828

Error: 14.1275 gl: 21

Trat	Medias	n	E.E.
1	31.21	8	1.33 A
2	29.81	8	1.33 A
4	23.43	8	1.33 B
3	20.10	8	1.33 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Las diferencias que se observaron en el análisis de varianza para la altura del tallo a los 60 días del trasplante, entre los cuatro tratamientos, también fueron significativas. Las soluciones Steiner (Trat 1) y Ferrán modificada (Trat 2) fueron iguales estadísticamente, pero ambas superaron significativamente a los tratamientos identificados como Ferrán y Haifa.

7.3 Longitud de raíz al trasplante

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
X7	32	0.28	0.00	42.94

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15.88	10	1.59	0.81	0.6252
Trat	1.77	3	0.59	0.30	0.8258
Rep	14.11	7	2.02	1.02	0.4436
Error	41.35	21	1.97		

Total	57.23	31
-------	-------	----

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=1.45907

Error: 1.9690 gl: 21

Trat	Medias	n	E.E.
1	3.55	8	0.50 A
3	3.39	8	0.50 A
4	3.21	8	0.50 A
2	2.92	8	0.50 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En el análisis de varianza y en la comparación de medias entre tratamientos usando la prueba de la DMS de Fisher se observó que no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en la longitud de la raíz al momento del trasplante.

7.3.1. Largo de raíz a los 20 días del trasplante

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
X8	32	0.62	0.43	17.78

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	20.81	10	2.08	3.38	0.0089
Trat	15.88	3	5.29	8.60	0.0006
Rep	4.93	7	0.70	1.15	0.3740
Error	12.92	21	0.62		

Total 33.73 31

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.81565

Error: 0.6153 gl: 21

Trat Medias n E.E.

1 5.47 8 0.28 A

4 4.36 8 0.28 B

2 4.33 8 0.28 B

3 3.49 8 0.28 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En este periodo se observaron diferencias significativas ($p > 0.01$) entre tratamientos originados por las cuatro soluciones nutritivas. Al comparar los promedios aritméticos con la prueba de la DMS de Fisher se observó que la solución Steiner (Trat 1) supero significativamente a las otras tres soluciones; Haifa (Trat 4) y Ferrán modificada (Trat 2) tuvieron un efecto estadísticamente similar sobre esta variable, pero ambos superaron significativamente al causado por la solución Ferrán (Trat 3).

7.3.2 Largo de raíz a los 47 días del trasplante

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
X9	32	0.93	0.90	13.09

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
-------------	-----------	-----------	-----------	----------	----------------

Modelo	2200.06	10	220.01	29.22	<0.0001
Trat	2078.43	3	692.81	92.01	<0.0001
Rep	121.63	7	17.38	2.31	0.0653
Error	158.12	21	7.53		
Total	2358.18	31			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.85320

Error: 7.5294 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
1	29.17	8	0.97	A
2	28.21	8	0.97	A
4	16.40	8	0.97	B
<u>3</u>	<u>10.05</u>	<u>8</u>	<u>0.97</u>	<u>C</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En el análisis de varianza y en la comparación de medias de tratamientos se detectaron diferencias significativas ($p=0.05$) para esta variable en el periodo de referencia; Las soluciones Steiner y Ferrán modificada fueron iguales estadísticamente, pero ambas superaron significativamente a Haifa y Ferrán.

7.3.3 Largo de raíz a los 60 días del trasplante

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>X10</u>	<u>32</u>	<u>0.81</u>	<u>0.71</u>	<u>17.53</u>

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	3242.97	10	324.30	8.68	<0.0001
Trat	2987.88	3	995.96	26.64	<0.0001
Rep	255.08	7	36.44	0.97	0.4746
Error	784.96	21	37.38		
Total	4027.92	31			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=6.35721

Error: 37.3790 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
2	45.39	8	2.16 A
1	41.99	8	2.16 A
4	31.39	8	2.16 B
3	20.73	8	2.16 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

El efecto que causaron las soluciones a los 60 días del trasplante fue significativo ($p=0.01$), tanto en el análisis de varianza como en la comparación de medias de tratamiento con la prueba de la DMS de Fisher. Las soluciones Ferrán modificada y Steiner, identificadas como Trat 2 y 1, respectivamente, causaron el mismo efecto sobre esta variable en ese periodo y ambas superaron estadísticamente al originado por Haifa y Ferrán.

7.4 Diámetro del tallo al trasplante

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
-----------------	----------	----------------------	-------------------------	-----------

X11	32	0.34	0.03	1	2.19
<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	0.27	10	0.03	1.08	0.4179
Trat	0.07	3	0.02	0.96	0.4290
Rep	0.20	7	0.03	1.13	0.3806
Error	0.52	21	0.02		
<u>Total</u>	<u>0.78</u>	<u>31</u>			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.16329

Error: 0.0247 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
2	1.36	8	0.06 A
3	1.30	8	0.06 A
1	1.25	8	0.06 A
<u>4</u>	<u>1.25</u>	<u>8</u>	<u>0.06 A</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

El análisis de varianza y la comparación de medias de tratamientos con la prueba de la DMS de Fisher no permitieron detectar diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos en el diámetro del tallo al momento del trasplante.

7.4.1 Diámetro del tallo a inicio de cosecha

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>X12</u>	<u>32</u>	<u>0.81</u>	<u>0.72</u>	<u>13.38</u>

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	10.99	10	1.10	9.14	<0.0001
Trat	9.83	3	3.28	27.29	<0.0001
Rep	1.15	7	0.16	1.37	0.2688
Error	2.52	21	0.12		
<u>Total</u>	<u>13.51</u>	<u>31</u>			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=0.36039

Error: 0.1201 gl: 21

<u>Trat</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
2	3.15	8	0.12 A
1	3.14	8	0.12 A
4	2.06	8	0.12 B
<u>3</u>	<u>2.01</u>	<u>8</u>	<u>0.12 B</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Con el análisis de varianza se detectaron diferencias significativas ($p=0.01$) entre tratamientos en el diámetro del tallo al iniciar la época de cosecha del material genético. Estas diferencias estadísticas se explican por la formación de dos grupos de soluciones: en el primero se puede observar a Ferrán modificada y Steiner, y en el segundo grupo a Haifa y Ferrán; ambos grupos se diferenciaron significativamente.

VIII. DISCUSIÓN

8.1 Crecimiento reproductivo (Número promedio de mini tubérculos)

La significancia estadística observada en las variables de rendimiento como número promedio de minituberculos en 10 plantas y promedio de minituberculos por cosecha donde el tratamiento 3 conformado por la solución Ferrán, presento un incremento en el número de mini tubérculos en comparación con la solución Haifa modificada a hidroponía, valor que comercialmente resulta de interés ya que representa mayor número de minituberculos por unidad de superficie de invernadero, con las características que los productores de papa requieren que son los que se ubican entre 15 y 20 milímetros de diámetro, que finalmente se convierten en utilidad económica para la empresa.

Particular relevancia adquiere el hecho de que la solución Ferrán promovió mayor formación de minituberculos por unidad de superficie, pero con valores menores en variables relacionadas con el crecimiento vegetativo como son altura del tallo a diferentes periodos de desarrollo donde la solución Ferrán presento los menores

resultados siendo superada por la solución Steiner que obtuvo valores mayores es decir favoreció el crecimiento vegetativo pero se vio afectado el crecimiento reproductivo, comportamiento que puede tener una estrecha relación con los componentes de la solución nutritiva, pues mientras Ferrán presenta mayor concentración de NO_3 , H_2PO_4 y K, Steiner tiene una mayor concentración de NO_3 , Ca, K. siendo las funciones que desarrollan estos nutrientes a los que se les puede atribuir lo antes mencionado.

Calori *et al.* 2018 y Caliskan *et al.* (2020) coinciden en mencionar que este comportamiento puede tener relación con el desarrollo de tallos laterales, mismos que se ramifican debajo de la superficie del suelo, cerca del tubérculo o semilla y pueden llegar a formar raíces, estolones y tubérculos como hacen los tallos principales, alcanzando a ser tan productivos como ellos, comportamiento que resulta de interés para los fines de producción de semilla pre básica o minitubérculos.

En este sentido es importante señalar que la nutrición juega un papel preponderante dado que, en etapas tempranas, el N puede favorecer el crecimiento vegetativo expresado por un mayor desarrollo del brote, pero se debe brindar particular atención, dado que el exceso de N en el momento de la tuberización puede limitar la iniciación y el llenado de los tubérculos (Oparka *et al.* 1987; Goins y Yorio, 2004; Caliskan *et al.*, 2020).

Vos y Vam der Putten (1998) argumentaron que la baja disponibilidad de N puede reducir la capacidad fotosintética de la planta de papa al disminuir el tamaño de la

hoja y esto podría reducir el crecimiento de los brotes de la planta y orientar la energía en la formación de minitubérculos, que es el objetivo central del trabajo. Es decir, un mejor control entre crecimiento vegetativo y reproductivo, resulta fundamental para conseguir el objetivo planteado, lo que ha sido ratificado por Flores *et al.* (2024).

El P es otro de los nutrientes esenciales para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas, vital para promover el crecimiento temprano y favorecer el Índice de cosecha de minitubérculos ya que este por ser un elemento estructural de la ribulosa bifosfato, de la membrana celular, de los fosfolípidos, núcleo proteínas, ácidos nucleicos juega un papel importante en la división y elongación celular, tránsito vesicular, el transporte, almacenamiento y liberación de energía durante todo el metabolismo de la planta, garantizando con ello el crecimiento celular (Mompies y Martín, 2012), lo que seguramente tuvo relación directa con el mayor número de minituberculos de tamaño comercial.

A lo anterior Martínez y Acuña, (2021) agregan que combinar la fertilización en la siembra con la aplicación de calcio durante el periodo de tuberización hace posible incrementar el rendimiento del cultivo y la concentración de calcio en los tubérculos cosechados, elemento que fue incluido en la conformación de la solución nutritiva referida.

8.2 Crecimiento vegetativo (Altura de tallo)

El nitrógeno (N) está directamente relacionado con el desarrollo de los brotes y con ello en el crecimiento de las plantas al ser responsable de conformar aminoácidos,

proteínas entre ellas la clorofila, ácidos nucleicos, enzimas, coenzimas, vitaminas, hormonas, entre otras, por lo que la deficiencia de N comúnmente provoca plantas débiles con hojas pálidas y amarillentas (Epstein y Bloom, 2006).

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para el crecimiento y el desarrollo de la papa (*S. tuberosum*). Su disponibilidad en el suelo en dosis suficientes promueve la organogénesis y el control del crecimiento del follaje y favorece la producción de tubérculos de mayor tamaño (Echeverría, 2005), comportamiento que se presenta de igual manera en plantas que desarrollan bajo condiciones de aeroponía.

En etapas tempranas, el N puede favorecer el desarrollo del brote, pero el exceso de N en el momento de la tuberización puede limitar la iniciación y el llenado de los tubérculos (Oparka *et al.*, 1987; Goins y Yorio 2004).

El nitrógeno se mueve en el sistema radicular por flujo de masas. Las formas asimilables del nitrógeno por las raíces de las plantas en el suelo son en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). En la mayoría de los suelos la acción de bacterias nitrificantes hace que los cultivos absorban en su generalidad nitrato. En otras situaciones especiales del suelo, como condiciones anaeróbicas, las plantas pueden absorber relativamente más amonio que nitrato (Vitra, 2020).

8.4 Diámetro del tallo a inicio de la cosecha

La falta de significancia en la etapa inicial se puede atribuir a que aún no se ejerce una influencia directa de los elementos que conforman la solución nutritiva, en tanto que al momento de iniciar la cosecha han transcurrido 90 días, tiempo suficiente para que los nutrientes ejerzan un efecto directo. Es preciso destacar que, en los diámetros del tallo, al inicio de la cosecha existieron dos soluciones que presentaron significancia estadística, Ferrán modificada y Steiner lo que se puede atribuir al efecto que probablemente ejercen la presencia de elementos como N, P, K y Ca principalmente.

El diámetro del tallo en la planta de papa al igual que en otros cultivos, constituye un indicador del crecimiento vegetativo, por lo que existen factores que presentan una relación directa con el comportamiento de este parámetro como la nutrición, la densidad de plantación y el tamaño de minitubérculo utilizado como semilla, así como origen de la plántula entre otros (Germán-Ortega, 2023), lo que permite obtener mayor vigor vegetativo cuando se combinan variables como un mini tubérculo o semilla de mayor calibre con menor densidad de plantación (Almeida *et al.*, 2015), lo que ha sido ratificado por Flores-López *et al.* (2024).

El diámetro del tallo y el área foliar en una plantación de papa, se benefician con el aumento de la distancia de plantación y el uso de calibres de tubérculos (semilla) de mayor tamaño, no así la altura y el número de tallos, que aumentan con la disminución del espacio entre plantas, en la medida en que disminuyó el tamaño de los calibres de los tubérculos (semilla), parámetros que interactúan significativamente con la nutrición (Almeida *et al.*, 2015).

Los cambios referidos anteriormente pueden soportarse con lo establecido por Moorby (1981), quien indicó que una mayor área de parénquima implica mayor reserva de asimilados que pueden ser utilizados en estructuras en crecimiento como ápices de tallo y raíz, estructuras reproductivas, así como el fruto en crecimiento, además de que una mayor área de xilema posibilita un mayor transporte de agua y nutrimentos hacia los órganos reproductivos.

IX. CONCLUSIONES

La Solución Ferrán (T1) superó estadísticamente al resto de los tratamientos o soluciones evaluadas por lo que se consolidó como la mejor opción para producción de mini tubérculos de papa bajo condiciones de aeroponía en Metepec, Estado de México.

X. RECOMENDACIONES

Con los resultados obtenidos en el presente trabajo se establecen las siguientes recomendaciones con el propósito de sentar las bases para futuras investigaciones:

- Utilizar la solución Ferrán para futuros trabajos de producción de mini tubérculos con fines de semilla pre básica de papa.
- Desarrollar el trabajo en fechas diferentes como iniciar en marzo y terminar en diciembre por considerar mejor época para el desarrollo de la plantación, lo que permitiría obtener diferentes ciclos de cultivo durante el año.
- Mejorar las instalaciones primordialmente en dos sentidos; ventilación para mejorar el manejo de temperaturas durante la temporada de calor, así como de calefacción durante la temporada de frío para sortear las bajas temperaturas invernales.
- Con el propósito de reducir costos de producción en cuanto a soluciones nutritivas se sugiere seguir explorando la integración o modificación en la

composición de la solución para obtener una con costos más atractivos para el productor, proceso que se siguió con Ferrán modificada pero no se consiguieron los resultados esperados en el presente trabajo.

XI. BIBLIOGRAFIA

- Almeida, F. M., Arzuaga Sánchez, J., Torres de la Noval, W., Cabrera Rodríguez J.A. (noviembre 2015). Efectos de diferentes distancias de plantación y calibres de tubérculos-semilla sobre algunas características morfo-productivas de la papa en Huambo, Angola. Redalyc. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/1932/193246554010/>
- Arias, D. (2009). Producción de Semilla prebásica en el sistema aeropónico en el Ecuador (Tesis de Ingeniería Agronómica). Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Baixauli Soria, C., & Aguilar Olivert, J. M. (2002). Cultivo sin Suelo de Hortalizas Aspectos Prácticos y Experiencias. Serie Divulgación Técnica. Recuperado de: <https://ivia.gva.es/documents/161862582/161863558/Cultivo+sin+suelo+de+hortalizas>
- Buckseth, T., Sharma, A. K., Pandey, K. K., Singh, B. P., & Muthuraj, R. (2016). Methods of pre-basic seed potato production with special reference to aeroponics-A review. *Scientia Horticulturae*, 204, 79-87, Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.03.041>
- Çalışkan, M.E., Yavuz, C., Yağız, A.K. *et al.* Comparison of Aeroponics and Conventional Potato Mini Tuber Production Systems at Different Plant Densities. *Potato Res.* 64, 41–53 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11540-020-09463-z>
- Calori, A. H., Factor, T. L., Feltran, J. C., Watanabe, E. Y., Moraes, C. C. de, & Purquerio, L. F. V. (2018). Seed potato minituber production in an aeroponic system under tropical conditions: electrical conductivity and plant density. *Journal of Plant Nutrition*, 41(17), 2200–2209. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1497652>

- Centro Internacional de la Papa (CIP). (2012). Manejo del tubérculo-semilla – Inventario de tecnologías e información para el cultivo de papa en Ecuador. Recuperado de <https://cipotato.org/papaenecuador/manejo-del-tuberculo-semilla/>
- Chandra, S., Shabana, K., Bharathi, A., Hemant, L., Min Hye, Y., Mahmoud, A. E., & Ikhlas, A. K. (2014). Assessment of total phenolic and flavonoid content, antioxidant properties, and yield of aeroponically and conventionally grown leafy vegetables and fruit crops: a comparative study. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2014, Article ID 2538752.
- Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE-ONU). (2014). Estándar S1, de la Comisión Económica para Europa de la Organización de las Naciones Unidas (CEPE-ONU), sobre comercialización y control de calidad de SEMILLA DE PAPA. Recuperado de: https://unece.org/DAM/trade/agr/promotion/Brochures/SeedPotatoes/ECE_TRADE_416_Spanish.pdf
- CONPAPA. (2017). Las papas, la nutrición y la alimentación. Recuperado de: <https://www.conpapa.org.mx/index.php/blog/item/8-las-papas-la-nutricion-y-la-alimentacion>
- Cuellar Bonilla, A. (2014). Aeroponía vertical rotación AGOSTO. Recuperado de: <https://agronegocios.com.py/?p=357>
- QU Dongyu (2022) Fao in 2022: Time for the extraordinary efforts to continue walking the talk. Recuperado de: [FAO in 2022: Time for extraordinary efforts to continue walking the talk](#)
- Echeverría, H. E. (2005). Papa. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. En H. E. Echeverría & F. O. Garcia (Eds.), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2006). Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas. Londrina, Editora Planta. Recuperado de: <http://www.editoraplanta.com.br/demoNM.pdf>
- FAO. (2022). Doubling global potato production in 10 years is possible. Recuperado de: <https://www.fao.org/newsroom/detail/doubling-global-potato-production-in-10-years-is-possible/es>
- Farran, I., & Mingo-Castel, A. (2006). Producción de mini tubérculos de papa usando Aeroponía: Efecto de la densidad de plantación e intervalos de recolección. Navarra, España, Departamento de Producción Vegetal, Instituto de Agrobiotecnología. DOI: [10.1007/BF02869609](https://doi.org/10.1007/BF02869609)
- Flores-López, R., Marín-Casimiro, M., Sotelo-Ruíz, E. y Flores-Gutiérrez, F.X. (2024). Altura de planta y rendimiento de la variedad de papa Fianna en

respuesta a la aplicación de cloruro de mepiquat en invernadero. Rev. Fitotec. Mex. 47(3): 261-268.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). FAOSTAT. Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Germán-Ortega. L. (2023). Origen de la plántula sobre la producción de minituberculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo un sistema de producción en aeroponía. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma del Estado de México. 55p. <http://hdl.handle.net/20.500.1799/140225>.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2010). Recuperado de: <https://www.gob.mx/inifap>
- Jerez Mompies, E., & Martín Martín, R. (2012). Comportamiento del crecimiento y el rendimiento de la variedad de papa (*Solanum tuberosum* L.) Spunta [Behavior of growth and yield of the potato (*Solanum tuberosum* L.) variety Spunta]. Redalyc. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193224709007>
- Lakhari, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. Journal of Plant Interactions, 13(1), 338-352. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308>
- Lakhari, I. A., Qureshi, W. A., Solangi, K. A., & Chandio, F. A. (2018). Potato production in aeroponics: an emerging food growing system in sustainable agriculture for food security. Chilean Journal of Agricultural Research. DOI: [10.4067/S0718-58392020000100118](https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000100118)
- Martínez G., I., & Acuña B., I. (2021). Aplicación de calcio durante la tuberización incrementa el rendimiento en el cultivo de la papa [en línea]. Informativo INIA Remehue, N° 281. Osorno, Chile. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.14001/68301>
- Martínez-Peñaloza, P. A. (2013). Aeroponía como método de cultivo sostenible, rentable e incluyente en Bogotá D.C., Colombia (Tesis de licenciatura). Universidad Piloto de Colombia. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/780>
- Mateus, M., & Chuquillanqui, C. (2012). Response of three potato cultivars grown in a novel aeroponics system for mini-tuber seed production. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/259040172_Response_of_three_potato_cultivars_grown_in_a_novel_aeroponics_system_for_mini-tuber_seed_production
- Mateus-Rodríguez, J.R., de Haan, S., Andrade-Piedra, J.L. *et al.* Technical and Economic Analysis of Aeroponics and other Systems for Potato Mini-

Tuber Production in Latin America. *Am. J. Potato Res.* **90**, 357–368 (2013).
<https://doi.org/10.1007/s12230-013-9312-5>

- Oparka, K. J., Davies, H. V., & Prior, D. A. M. (1987). The influence of applied N on export and partitioning of current assimilate by field-grown potato plants. *Annals of Botany* <https://doi.org/10.1093/aob/mcf311>
- Otazú, V. (2010). Manual de producción de semilla de papa de calidad usando aeroponía. Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa (CIP). ISBN 978-92-9060-398-6. 41 p. Recuperado de <https://www.cipotato.org>
- Otazú, V. (2015). Manual para la Producción de Semilla de Papa usando Aeroponía. Centro Internacional de la Papa (CIP). <https://doi.org/10.4160/9789290604556>
- Ranalli, P., Bassi, F., Ruaro, G., Del Re, P., Di Candilo, M., & Mandolino, G. (1994). Microtuber and minituber production and field performance compared with normal tuber. *Potato. Microtuber and minituber production and field performance compared with normal tubers | Potato Research*
- Ritter, E., Angulo, B., Riga, P., Herrán, C., Relloso, J., & San José, M. (2001). Comparación de sistemas de cultivo hidropónico y aeropónico para la producción de minitubérculos de papa [Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers | Potato Research](#)
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2009). Recuperado de: <https://www.nacionmulticultural.unam.mx/empresasindigenas/docs/1861.pdf>
- SIAP. (2020). Avance de Siembras y Cosechas Resumen por cultivo Situación al 31 de DICIEMBRE. Recuperado de: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenDelegacion.do
- SIAP. (2024). Panorama agroalimentario. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- Steiner, A. A. (1968). Soilless culture. En *Proceedings of the 6th Colloq. Int. Potash Inst., Florence, Italy* (pp. 324-341). Recuperado de <https://research.wur.nl>
- Urrestarazu Gavilán, M. (2015). Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/286246416_Manual_practico_del_cultivo_sin_suelo_e_hidroponia
- Vitara. (2020). La gran importancia del nitrógeno en las plantas. *AgroVitra*. Recuperado de <https://www.agrovitra.com/media/2022/12/Importancia-del-Nitrogeno-en-las-plantas-Fernanda-Habit.pdf>

- Vos, J., & van der Putten, P. E. L. (1998). Nutrient cycling in a cropping system with potato, spring wheat, sugar beet, oats and nitrogen catch crops. I. Input and offtake of nitrogen, phosphorus and potassium. ResearchGate. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/227195217_Nutrient_cycling_in_a_cropping_system_with_potato_spring_wheat_sugar_beet_oats_and_nitrogen_catch_crops_I_Input_and_offtake_of_nitrogen_phosphorus_and_potassium