



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**EVALUACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA EN CONDICIONES DE
AEROPONÍA**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA

ILSE ABIGAIL GARCIA LOZANO

DIRECTOR DE TESIS

DR. SIGFRIDO DAVID MORALES FERNÁNDEZ

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2022



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**EVALUACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA EN CONDICIONES DE
AEROPONÍA**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA

ILSE ABIGAIL GARCIA LOZANO

DIRECTOR DE TESIS

DR. SIGFRIDO DAVID MORALES FERNÁNDEZ

ASESORES

M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

M.C. FABIEL VAZQUÉZ CRUZ

M.C. CÉSAR DAVID TORRES FERNÁNDEZ

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2022

La presente tesis titulada “**Evaluación del cultivo de papa en condiciones de aeroponía**” y realizada por **Ilse Abigail Garcia Lozano**, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias

Consejo Particular integrado por:

Firma

Director: Dr. Sigfrido David Morales Fernández



Asesor: M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín



Asesor: M.C. Fabiel Vázquez Cruz



Asesor: M.C. César David Torres Fernández



San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Mayo de 2022.

El presente trabajo forma parte del Cuerpo Académico denominado: **Manejo Integral de Cultivos Agrícolas** y de la Línea de Investigación: **Cambios Fisiológicos, Físicoquímicos y Bioquímicos en el Manejo de Cultivos y Productos Hortofrutícolas**. Dicho trabajo, fue financiado con recursos propios.

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis principalmente a mi madre quien me dio la vida y siempre estuvo a mi lado apoyándome en los momentos buenos y malos.

A mi hermana quien siempre ha sido una figura de inspiración, que con sus palabras me ha motivado a ser siempre mejor persona.

A mi padre quien no dejo de brindarme su apoyo y procuro que nunca me faltará nada.

Y en especial a mi padrastro la persona que siempre me brindo su amor incondicional, apoyo y confianza.

AGRADECIMIENTOS

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica por la formación recibida durante mi estancia.

Al Dr. Sigfrido David Morales Fernández por su orientación y atención durante mis estudios y la realización de la presente investigación.

Al M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín por sus valiosos consejos y apoyo incondicional en todo momento.

Al M.C Fabiel Vázquez Cruz por sus valiosas asesorías en los conceptos de sistemas de riego.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en el desarrollo de esta investigación.

Contenido	Página
-----------	--------

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
III. HIPÓTESIS	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1 Origen y distribución.....	5
4.2 Clasificación taxonómica	6
4.3 Descripción botánica y morfológica.....	6
4.4 Importancia del cultivo	7
4.4.1 Importancia internacional	7
4.4.2 Importancia nacional	7
4.6 Factores agroecológicos	8
4.6.1 Temperatura y clima.....	8
4.6.2 Humedad relativa optima.....	8
4.6.3 Fotoperíodo.....	9
4.6.4 Requerimientos hídricos	9

4.6.5 Requerimientos edáficos.....	9
4.7 Fertilización.....	10
4.7.1 Elementos primarios.....	10
4.7.2 Elementos secundarios	11
4.8 Sistemas de reproducción de papa.....	11
4.8.1 Propagación <i>in vitro</i>	12
4.8.2 Propagación <i>in vivo</i>	12
4.8.3 Estolones.....	13
4.9 Fenología	13
4.9.1 Crecimiento y desarrollo	13
4.9.2 Unidades calor	15
4.10 Rendimiento.....	16
4.11 Variedades de papa.....	17
4.12 Aeroponía	18
4.12.1 Importancia de la aeroponía	19
4.12.2 Ventajas	19
4.12.3 Desventajas.....	19
4.12.4 Aeroponía en papa.....	20
V. MATERIALES Y MÉTODOS	22
5.1 Localización del sitio experimental.....	22
5.2 Módulo de aeroponía.....	23
5.3 Material vegetal	24
5.4 Manejo del cultivo.....	24
5.4.1 Trasplante en el módulo de aeroponía.....	24
5.4.2 Tutorado y podas	24
5.4.3 Monitoreo y control de plagas y enfermedades.....	25

5.4.4 Fertilización y riego.....	25
5.5 Parámetros evaluados	26
5.5.1 Grados día a estoloneo.....	26
5.5.2 Grados día a inicio de tuberización	26
5.5.3 Grados día a madurez fisiológica	27
5.5.4 Número de tubérculos por planta.....	27
5.5.5 Peso de tubérculos por planta	27
5.5.6 Peso promedio de tubérculo	27
5.5.7 Altura de planta	27
5.5.8 Longitud de raíz.....	27
5.5.9 Diámetro de tallo	27
5.5.10 Peso seco de la parte aérea.	28
5.5.11 Peso seco de la parte radicular.....	28
5.6 Diseño experimental.....	28
5.7 Análisis estadístico	29
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
6.1 Temperatura.....	30
6.2 Análisis de varianza de la fenología, rendimiento y biomasa	31
6.3 Análisis de los factores principales en la fenología, rendimiento y biomasa	33
6.4 Análisis de los efectos de interacción en la fenología, rendimiento y biomasa	35
6.4.1 Interacción variedad*densidad de población.....	35
6.4.2 Interacción variedad*tamaño de semilla	36
6.4.3 Interacción densidad de plantación*tamaño de semilla	37
6.4.4 Interacción variedad*densidad de plantación*tamaño de semilla.....	39
VII. CONCLUSIÓN	42
VIII. LITERATURA CITADA	43

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía de la papa.....	6
Cuadro 2. Riego por etapas	26
Cuadro 3. Tratamientos a evaluar	29
Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables fenológicas, de rendimiento y biomasa en el cultivo de papa, producidas en aeroponía. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.....	32
Cuadro 5. Fenología, rendimiento y materia seca en los factores variedades, densidad de plantación y tamaño de la semilla tubérculo del cultivo de papa. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.....	34
Cuadro 6. Comportamiento de la fenología, rendimiento y biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.	35
Cuadro 7. Comportamiento de la fenología, rendimiento y biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.....	37
Cuadro 8. Comportamiento de la fenología, rendimiento y biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.....	38
Cuadro 9. Comportamiento de la fenología y caracteres agronómicos del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.....	40
Cuadro 10. Comportamiento de la biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.....	41
Cuadro 11. Comportamiento del rendimiento de papa y sus componentes por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización	22
Figura 2. Medidas módulo de aeroponía	23
Figura 3. Temperaturas del aire registradas en el exterior del módulo aeropónico en condiciones de invernadero. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020. Las flechas indican los días de inicio de estoloneo (DIE), tuberización (DIT) y madurez fisiológica del tubérculo (DMF). Valores promedio de dos variedades.....	30

EVALUACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA EN CONDICIONES DE AEROPONÍA

RESUMEN

El propósito de la presente investigación fue evaluar el crecimiento y rendimiento de papa en condiciones de aeroponía como respuesta al uso de diferentes tamaños de semilla-tubérculo y densidades de plantación. El experimento se estableció bajo el diseño completamente al azar, utilizando como material vegetal las variedades Fianna y Ágata. Fianna fue la que registro el ciclo del cultivo más largo (641 grados día), siendo esta misma la más sobresaliente en rendimiento. Los resultados obtenidos en el factor densidad de plantación fueron estadísticamente similares a excepción de peso promedio del tubérculo que fue 42% mayor en la densidad de 16 plantas·m⁻² que en la de 26 plantas·m⁻². Se observó que independientemente del tamaño de la semilla tubérculo empleada durante la siembra, la edad fisiológica y el estado de madurez son los parámetros para influenciar en el rendimiento dado que se obtuvo mayor rendimiento en la semilla de 5g que en la de 25 g. En general la duración del ciclo no repercutió en un mayor peso de tubérculos por planta como si ocurrió en el factor tamaño de la semilla.

Palabras clave: Aeroponía, semilla-tubérculo, fenología, rendimiento.

POTATO CROP ASSESSMENT UNDER AEROPONIC CONDITIONS

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate potato growth and yield under aeroponic conditions in response to the use of different tuber-seed sizes and planting densities. The experiment was established under the completely randomized design, using as plant material the varieties Fianna and Ágata. Fianna was the one that registered the longest cultivation cycle (641 degrees day), being itself the most outstanding in yield. The results obtained in the planting density factor were statistically similar except for the average weight of the tuber which was 42% higher in the density of 16 plants-m⁻² than in the 26 plants-m⁻². It was observed that regardless of the size of the tuber seed used during sowing, physiological age and state of maturity are the parameters to influence the yield since it was obtained greater yield in the seed of 5g than in the one of 25 g. In general, the duration of the cycle did not affect a greater weight of tubers per plant as if it occurred in the size factor of the seed.

Key words: Aeroponic, tuber-seed, phenology, yield.

I. INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es uno de los alimentos más importantes del mundo, superado por la caña de azúcar, trigo, arroz y maíz. Según las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019), indican que a nivel mundial se cosechan alrededor de 17.5 millones de hectáreas con una producción cercana a 370 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 20.9 t·ha⁻¹, siendo China el principal productor, seguido por la India, Estados Unidos, Rusia y Alemania.

México ocupa el lugar 31 en la producción mundial de este importante tubérculo, se cultivan alrededor de 68 000 ha de donde se obtienen 1.8 millones de toneladas. Se produce en 23 estados siendo Sonora el principal productor de papa a nivel nacional con el 24.5 % del total (SIAP, 2017).

El crecimiento y la producción en el cultivo de papa está determinada entre otros factores por la duración de su ciclo biológico, determinado por un conjunto de fases y etapas fenológicas, y la variación en éstas depende del ambiente y del cultivar (Kooman *et al.*, 1996), aunque en condiciones no limitantes, la temperatura es un elemento que afecta drásticamente la producción de la biomasa, sobre todo cuando éstas son mayores de 20 °C y se presentan durante la etapa de llenado del tubérculo (Rykaczewska, 2015).

La formación de tubérculos depende, entre otros factores, de la disponibilidad de asimilados y la habilidad de los tubérculos para acumularlos. Al inicio del desarrollo del cultivo, los foto-asimilados se destinan principalmente al desarrollo de hojas, tallos y raíces. Sin embargo, este comportamiento cambia al iniciar la tuberización y crecimiento de los tubérculos debido a que incrementan la demanda de asimilados (Wolf, 1993), de tal forma que los carbohidratos producidos en las hojas a lo largo del ciclo del cultivo, son trasladados a estas estructuras.

La técnica de aeroponía es un método alternativo de cultivo sin suelo en entornos de crecimiento controlado. Los órganos están encerrados en una cámara oscura y la fertilización se suministra mediante una solución nutritiva por medio de un dispositivo de nebulización que puede ser recirculada para volver a utilizar. Este sistema de producción

optimiza la aireación del sistema radicular, que es un factor importante que conduce al incremento del rendimiento (Andrade-Piedra *et al.*, 2015; Chiipanthenga *et al.*, 2012; Soffer y Burger, 1988).

La aeroponía es una técnica para producir minitubérculos de papa (correspondientes a la categoría de semilla prebásica) y se inscribe en los sistemas formales de semilla, es decir aquellos en los que el Estado regula la producción y distribución de semilla certificada. Como tal, es una tecnología que requiere ciertas condiciones de infraestructura y de recursos humanos, que hacen que sea apta únicamente para productores de semilla altamente especializados (Farran y Mingo-Castel, 2006).

Algunos estudios realizados sobre la producción de minitubérculos semilla de papa en un sistema aeropónico a densidades de 60 y 100 plantas·m⁻², con intervalos de cosecha de 7, 10, y 14 días después del inicio de tuberización, indicaron que los mejores rendimientos se obtuvieron a una densidad de siembra de 60 plantas·m⁻², cosechados cada 7 días, con una producción de 800 minitubérculos por m⁻², mostrando un rendimiento total de 118.6 g·planta⁻¹ (Farran y Mingo, 2006). Otras investigaciones sobre variedades y estudios de calidad, han mostrado que a menores densidades el número de tubérculos por planta y peso de éstos es mayor (CIP, 2008), aunque el peso promedio de cada tubérculo fue similar independientemente del número de plantas por unidad de superficie. Asimismo, la calidad de los tubérculos producidos mediante aeroponía es mejor que aquellos obtenidos a través los métodos tradicionales (Chiipanthenga *et al.*, 2012).

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como propósito evaluar el rendimiento y crecimiento de dos variedades de papa en condiciones de aeroponía como respuesta al uso de dos tamaños de semilla-tubérculo y dos densidades de plantación.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el crecimiento y rendimiento de papa en condiciones de aeroponía como respuesta al uso de diferentes tamaños de semilla-tubérculo y densidades de plantación.

2.2 Objetivos específicos

Determinar la duración de las etapas de desarrollo en las variedades de papa Ágatha y Fianna.

Evaluar el rendimiento y sus componentes en las variedades de papa Ágatha y Fianna.

III. HIPÓTESIS

El uso de diferente tamaño de semilla tubérculo, densidad de plantación y variedades de papa afecta la duración de las etapas de crecimiento, rendimiento y sus componentes.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Origen y distribución

La papa se domesticó en Sudamérica, específicamente en Bolivia, entre los lagos Titicaca y Poopó, aunque los primeros vestigios se encontraron en el cañón de Chilca, al sur de Lima en Perú que datan de una antigüedad de hace 10 500 años. Y aunque existe controversia y opiniones muy diversas en cuanto al origen de la papa, sin duda se estima que el altiplano peruano-boliviano es el centro de origen de este importante cultivo (Lujan, 1996). De acuerdo con Spooner y Hetterscheid (2005) *Solanum tuberosum ssp andigenum* tuvo su origen en el sur de Perú a partir del complejo *Solanum brevicaulle*, en tanto que la *ssp tuberosum* en las tierras bajas de la parte central de Chile.

Hawkes (1994) reporta que en América hay unas 200 especies de papas silvestres, y en el suroeste de Estados Unidos y Centro América, generalmente se encuentra en altitudes que van de medias a altas; mientras que en Sudamérica se localizan a lo largo de los Andes desde Venezuela hasta el noroeste de Argentina y en las tierras bajas de Chile, Argentina, Uruguay, Paraguay y el sureste de Brasil.

Esta especie se distribuye de forma nativa en el continente americano, más específicamente en centro y Sudamérica y se difundió como cultivo a todo el mundo, adaptándose a la mayoría de las zonas agroecológicas. Actualmente se cultiva en más de 130 países en América, Europa, África, Asia y Oceanía (García, 2008), y cubre en todo el mundo alrededor de 18 millones de toneladas, representando aproximadamente la mitad de la producción mundial de raíces y tubérculos (Sturik y Wiersema, 1999).

Una gran cantidad de especies silvestres de papa han sido identificadas en países como México, Bolivia y el norte de Argentina lo que los ubica como posibles centros de diversificación (Hawkes, 1990). La mayoría de especies crecen en los Andes, 28 de ellas se desarrollan en México (Spooner y Hetterscheid, 2005), y se localizan en todos los estados, con excepción de Baja California, Campeche, Tabasco, Quintana Roo y Yucatán (Villa-Vázquez y Rodríguez, 2010).

4.2 Clasificación taxonómica

La familia *Solanaceae* contiene muchos de los cultivos que se conocen como es el tomate, berenjena, tabaco, chiles y la papa. *Solanum tuberosum* se divide en dos sub especies: *tuberosum* y *andigena*. La subespecie *tuberosum* (Cuadro 1) es cultivada en Norte América y Europa, mientras que la *andigena* lo es en el Centro y Sur América (Hawkes, 1990; Hanneman, 1994).

Cuadro 1. Taxonomía de la papa

Taxonomía	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnolipsida
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Genero	<i>Solanum</i>
Especie	<i>Solanum tuberosum</i> L.
Sub especie	Tuberosum

Fuente: OECD, 1997.

4.3 Descripción botánica y morfológica

La descripción general de *Solanum tuberosum* de acuerdo a la OECD (1997) es la siguiente: Herbácea perenne con tallos débiles que crecen hasta un máximo de tres pies, hojas largas y pinnadas, ovadas, con hojas más pequeñas dispuestas a lo largo del nervio central. Las flores son blancas, moradas, rosadas o azuladas, en racimos, generalmente con una corola de cinco partes y estambres con filamentos muy cortos. Los frutos son amarillentos o verde, globosos, y de menos de una pulgada de diámetro. Algunos carecen

de semillas, pero otros pueden contener varios cientos. Los humanos no pueden comer los frutos debido a la presencia de toxinas. Los tubérculos nacen al final de los estolones. Son redondos a ovalados. La pulpa es generalmente blanca o crema con amarillo, el color de la piel marrón claro a rojo. Los tubérculos pueden contener altos niveles de solanina, un alcaloide tóxico.

4.4 Importancia del cultivo

Solanum tuberosum es uno de los cultivos de mayor importancia en el mundo tanto en volumen de producción como por los aportes nutricionales que brinda a la sociedad (Spooner y Hetterscheid, 2005). Se ubica en el cuarto lugar, sólo después de los cultivos de maíz, trigo y arroz, lo que le permite ser posicionado como uno de los principales alimentos que sustentan la nutrición del mundo y un gran generador de divisas a los agricultores (Rodríguez, 2009). Ocupando un lugar preponderante en muchos países con un gran número de habitantes.

4.4.1 Importancia internacional

El producto llega a más de 1 000 millones de consumidores en todo el mundo, donde figuran en ese total 500 millones de los países en vías de desarrollo (Salomón, 2001). La papa está ubicada entre los primeros cuatro cultivos de mayor importancia en el mundo, sólo después del arroz, trigo y maíz, con una producción de 368 168 913 t, de las cuales 46 596 360 son producidas en América. Durante 2018, la superficie cosechada de esta especie fue de 17 578 672 ha, y sus principales productores fueron China (180 580 597 t), India (48 529 000 t), Ucrania (22 503 970 t), Federación de Rusia (22 394 960 t) y Estados Unidos de América (20 607 342 t). El rendimiento promedio mundial fue de 20.9 t·ha⁻¹ (FAOSTAT, 2018).

4.4.2 Importancia nacional

En México se cultivan 59 732 ha, el 66 % en condiciones de riego y 34 % en temporal, con rendimientos promedio de 34.39 y 23.17 t·ha⁻¹, respectivamente. Las zonas con las mejores condiciones edafoclimáticas para la producción de papa se localizan sobre

el Sistema Volcánico Transversal, donde destacan el Estado de México, Puebla y Veracruz. Mientras que los principales productores de este cultivo son Sonora y Sinaloa con 4 mil 685 millones de pesos; con producciones menores, Veracruz y Nuevo León obtuvieron más de mil millones de pesos cada uno por la comercialización de las cosechas de papa. (SIAP, 2019).

4.6 Factores agroecológicos

Las condiciones ambientales en las que se puede cultivar con éxito *Solanum tuberosum* L. son muy diversas, esto puede ser concluido del hecho que las papas son cultivadas en muchas partes del mundo. Un amplio espectro de cultivares se adaptan a estas diferentes condiciones ambientales (OECD. 1997). Aragón (1995) mencionan que la papa prospera hasta elevaciones de 3000 m y varía para cada genotipo.

4.6.1 Temperatura y clima

El tubérculo no puede sobrevivir a una temperatura de -3 °C o menos. El follaje muere a temperaturas de -4 °C (Van Swaaij *et al.*, 1987; Vayda, 1994. Dale (1992) indica que los tubérculos de papa son destruidos por un período de congelación de 25 horas a -2 °C o un período de congelación de cinco horas a -10 °C. Temperaturas bajas o altas, particularmente en la noche puede obstruir la formación de tubérculos (OECD. 1997).

Requiere una temperatura media diaria de 21 – 33 °C, no se considera una especie tolerante a altas temperaturas. Si la temperatura es demasiado elevada, afecta a la formación de los tubérculos. La traslocación de carbohidratos se reduce a temperaturas mayores de 25 °C y por arriba de 35 °C, la elongación del tallo se detiene (Gawronska *et al.*, 1988; Santibáñez, 1994).

4.6.2 Humedad relativa optima

Santibáñez (1994) menciona que alta humedad ambiental favorece el crecimiento del tubérculo.

4.6.3 Fotoperíodo

Se considera un cultivo neutro a la luz del día, lo que significa que la etapa de crecimiento de los tubérculos es independiente de la duración del día, pero hay cultivares que se dan mejor en día largo (Benaccio, 1982; OECD. 1997). Barona *et al.* (2015) mencionan que el inicio de la formación de tubérculos de las plantas de papa está muy influenciado por la duración del día. Las variedades de la región andina son promovidas por el fotoperiodo corto, que en este caso es de alrededor de 12 horas de luz y 12 de oscuridad, por el contrario, en latitudes mayores, las variedades de papa de estas zonas tuberizan en fotoperiodos largos durante el verano, con días de más de 16 horas de luz y noches cortas.

4.6.4 Requerimientos hídricos

El suelo debe mantener un contenido de humedad relativamente elevado. Las mejores cosechas, en cultivos de 120 a 150 días, se obtienen con de 500 a 700 mm de agua. En general, la falta de agua hace disminuir la producción cuando se produce a mitad o fines del período de desarrollo, más que si falta al inicio. Cuando hay poca agua, ésta se concentra en obtener la producción máxima por hectárea en vez de aplicarse a una superficie más amplia (FAO, 2008).

4.6.5 Requerimientos edáficos

La papa crece en la mayoría de los suelos, pero donde la recolección es mecánica los suelos ligeros y con cuerpo medio causan menos dificultad en la cosecha cuando las condiciones meteorológicas son adversas (IFA, 1992).

Requiere suelos con profundidad mayor de 30 cm (IAC, 1990).

Los mejores suelos son los francos, franco-arenosos, franco-limosos y franco-arcillosos, de textura liviana, con buen drenaje y con una profundidad efectiva mayor de los 0.50 m, que permitan el libre crecimiento de los estolones y tubérculos y faciliten la cosecha (Román y Hurtado, 2002).

Las papas pueden tolerar un amplio rango de pH del suelo, normalmente 5 o más alto, pero se ha observado buena producción a un pH de 3.5 (Vayda, 1994).

El IFA (1992) menciona que el requerimiento mínimo de pH es de 5.5, pero por debajo de 4.8 el crecimiento se ve perjudicado.

4.7 Fertilización

El cultivo de papa demanda grandes cantidades de nutrimentos, principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) durante todo su ciclo (White *et al.*, 2007), y en ocasiones elementos como Ca, Mg, y S (Porras, 2005), lo mismo como el B (Barrera, 1995).

4.7.1 Elementos primarios

Cuando se aplican cantidades de nitrógeno muy altas, en relación con la disponibilidad de los otros elementos, se induce a la producción de papas extra grandes, pero se reduce su contenido de almidones. Además, aumenta la susceptibilidad de las plantas a las plagas, especialmente a las enfermedades causadas por hongos y bacterias. El P_2O_5 y el K_2O deben aplicarse en su totalidad al momento de la siembra (Román y Hurtado, 2002).

El fósforo estimula el crecimiento inicial de las plantas y la formación de las raíces; acelera la madurez y estimula la producción de semillas. Las necesidades de fertilización fosfatada aumentan cuando el crecimiento de las plantas ha de efectuarse en tiempo frío, cuando las plantas tienen un desarrollo radicular limitado y cuando se requiere un crecimiento inicial rápido de la parte aérea de la planta (INIA, 2017).

Potasio. Este nutriente actúa en la formación de carbohidratos y en la transformación y el movimiento del almidón desde las hojas a los tubérculos de la papa. También es importante en el control del movimiento de estomas y del agua de la planta.

De acuerdo con recomendaciones reportadas por el IFA (1991), los promedios de requerimientos nutricionales de la papa en $kg \cdot ha^{-1}$ Son: N = 130, P_2O_5 = 150, K_2O = 175.

4.7.2 Elementos secundarios

Calcio. Constituye una parte esencial de la estructura de la pared celular, y su presencia es indispensable para la formación de nuevas células. Está relacionado con la neutralización y la insolubilización de ciertos ácidos orgánicos de la planta. La deficiencia de calcio, cuando es marcada, provoca la total ausencia de producción de tubérculos. En los casos menos graves aparecen puntos muertos en la zona medular de los tubérculos y un enrollado de las hojuelas (Montaldo, 1984; Román y Hurtado, 2002).

El magnesio es esencial para la fotosíntesis. Es necesario para la activación del metabolismo de los carbohidratos y la respiración de la célula; también es un activador de muchas enzimas requeridas en los procesos de crecimiento de las plantas.

Azufre. Elemento importante en la síntesis de compuestos orgánicos. La deficiencia de este nutriente retarda el crecimiento de las plantas, las que se ponen uniformemente cloróticas, raquílicas y alargadas, con tallos débiles (INIA, 2017).

Boro. requiere muy pequeñas cantidades de Boro. La deficiencia se manifiesta en los tubérculos, que se deshacen después de cocidos, mientras que el exceso puede manifestarse como una quemadura marginal en las hojuelas y de un enrollamiento,

Manganeso. actúa en la síntesis de la clorofila y en la fotosíntesis; su deficiencia se manifiesta por clorosis de las hojuelas, que se reducen en tamaño y tienen tendencia a enrollarse hacia la cara superior afectándose el rendimiento.

4.8 Sistemas de reproducción de papa

Usualmente su propagación comercial se realiza a través de tubérculos-semilla. La aplicación del cultivo de tejidos y las técnicas aceleradas de multiplicación para la producción de semilla original, se han expandido tanto a países desarrollados como a otros menos desarrollados, pero debe estar bien fundamentada la creación de un programa de producción de semilla, dado lo costoso que resulta (Beukema *et al.*, 2000).

En la multiplicación asexual, los principales factores de calidad de las semillas son la sanidad y el estado fisiológico. La pureza física y la pureza genética son de menor importancia, ya que el tamaño de los tubérculos permite eliminar, de manera relativamente

fácil, materiales inertes y mezclas de semilla de otras variedades o especies (Andrade-Piedra, 2015).

Las papas son susceptibles a una serie de enfermedades que reducen la productividad y la calidad de los tubérculos. Además, los patógenos y plagas se acumulan durante la clonación sucesiva del tubérculo (degeneración de la semilla) y en el suelo donde se cultivan por eso la producción de papa depende de la renovación constante del material de siembra libre de enfermedades (FAO, 2008; Thomas-Sharma *et al.*, 2015).

En la mayoría de los países, la degeneración de la semilla de papa se maneja principalmente mediante la compra de semilla sana, producida fuera de la parcela, por lo general certificada importada de otros países, como lo es Holanda que exporta alrededor de 650 000 t anuales de semilla (Beukema *et al.*, 2000). En contraste otros países, por ejemplo, Colombia, Ecuador y Perú, casi todos los agricultores separan una parte de su cosecha para destinarla como semilla en el próximo ciclo de cultivo. En la mayoría de los casos esta semilla son las que no se pueden vender en el mercado o consumir en el hogar, porque son pequeños y tienen daños de plagas y enfermedades. Cuando se siembran estos tubérculos se obtienen plantas débiles que emergen de manera desigual, afectando el rendimiento del cultivo (Andrade-Piedra, 2015; Quiñones *et al.*, 2004).

4.8.1 Propagación *in vitro*

Una innovación importante para la industria de la papa fue la adopción generalizada del cultivo tisular o micropropagación, como sistema para multiplicar plantas libres de enfermedades, que se pueden usar para producir tubérculos semilla sanos. Primero se eliminan los virus y otros patógenos cultivando plantas de papa en un ambiente controlado a temperatura elevada. Después se colocan los brotes libres de enfermedades en un medio nutritivo estándar en recipientes de vidrio (*in vitro*) en un entorno por completo aséptico de laboratorio (FAO, 2008).

4.8.2 Propagación *in vivo*

La FAO (2008) promueve una opción prometedora y económica, el uso de cortes muy pequeños de un solo nudo o brote de aproximadamente 1.5 cm que se pueda cultivar

para producir plántulas en escala comercial. El material inicial debe ser unas cuantas plántulas obtenidas por micropropagación y libres de enfermedades. Cada corte se propaga en una sala de cultivo o en un vivero con sombra, en una mezcla de turba y arena, en bandejas de plástico sobre bases de metal.

4.8.3 Estolones

Los estolones dan origen a los tubérculos, cuyo ejercicio es el más adoptado en todo el mundo. Los tubérculos presentan en su superficie nudos con hojas escamosas, arreglados de manera espiral, y cada uno de ellos consta de una o más yemas pequeñas. Cuando se inicia el crecimiento del vástago principal las raíces adventicias se desarrollan en la base del tubérculo y las yemas horizontales se alargan y producen tallos en forma de estolones. A partir de los tubérculos que han formado ramas horizontales se forman tubérculos nuevos (Cuesta *et al.*, 2002; Rubio *et al.*, 2000).

4.9 Fenología

El estudio de la fenología permite identificar ciertos fenómenos biológicos que ocurren a cierto ritmo de crecimiento de las plantas (etapas) afectados por las condiciones ambientales (Mundarain *et al.*, 2005), y el análisis de esos periodos de crecimiento o etapas es primordial para alcanzar el máximo potencial de producción en los cultivos (Morales-Fernández *et al.*, 2018), al identificar los principales factores que inciden directamente en cada etapa de crecimiento del cultivo (Prabhakar *et al.*, 2007).

4.9.1 Crecimiento y desarrollo

El incremento irreversible en talla y volumen de órganos, tejidos, células o individuos se conoce como crecimiento. El desarrollo del cultivo de papa se presenta a través de ciertas etapas fenológicas y que según Dwelle (2003) se clasifican en desarrollo de brote, establecimiento de la planta, inicio de tuberización, llenado del tubérculo y

maduración de éste. Factores como el genotipo, el ambiente de producción, la altitud, temperatura, tipo de suelo y la disponibilidad de humedad afectan la duración de cada etapa fenológica (Kolbe y Stephan-Beckmann, 1997).

En el desarrollo del brote, los tubérculos han dejado la condición de reposo y tienen la capacidad de brotar, siempre que las condiciones ambientales sean favorables para el crecimiento (alta temperatura); el establecimiento de la planta se refiere al periodo comprendido entre la brotación y la iniciación del tubérculo, caracterizado por el crecimiento de hojas y ramas en la parte aérea, y de las raíces y estolones en la parte subterránea; inicio de tuberización, comprende a la formación del tubérculo en la punta del estolón, no obstante que su crecimiento puede ser imperceptible. En muchas variedades, el término de este evento coincide con el inicio de la floración.

Durante la tuberización (llenado del tubérculo), ocurre una expansión celular a consecuencia de la acumulación de agua, nutrientes y carbohidratos, y el tubérculo se convierte en un sitio activo de almacenamiento de carbohidratos y sustancias orgánicas. El llenado del tubérculo se identifica como un estado crítico en la producción y calidad de la papa, factores como la temperatura, nutrición, edad fisiológica del tubérculo, densidad de población, fechas de siembra, disponibilidad de humedad, y plagas y enfermedades afectan esta etapa fenológica. En la madurez fisiológica, el follaje pierde el color verde característico y se presenta una pérdida de hojas, asimismo, decrementa la fotosíntesis, el crecimiento del tubérculo tiende a disminuir, y se alcanza la máxima acumulación de materia seca.

De acuerdo con Lulai (2004), el llenado del tubérculo de papa es un proceso complejo que integra diferentes componentes biológicos que pueden influir en la producción, madurez química del tubérculo, desarrollo de enfermedades y fisiopatías. Se ha observado que las hormonas vegetales, temperatura y duración del día, afectan la tuberización que se inicia al recibir el estímulo en el estolón. Alto contenido de giberelinas detiene la formación de tubérculos, en tanto que la baja presencia de éstas la promueve. Factores de transcripción proteícos unidos al ADN pueden regular la acción de los genes y en ocasiones el contenido hormonal, lo que puede afectar el crecimiento de la planta y el inicio de la tuberización (Hannapel *et al.*, 2004).

Morales-Fernández *et al.* (2018) destacan la importancia del crecimiento y desarrollo del cultivo de papa, medido a través de las etapas fenológicas e indica que el

inicio de estoloneo, de tuberización y madurez fisiológica del tubérculo son las de mayor importancia. Hannapel *et al.* (2004) indican que el inicio y plena tuberización son procesos básicos en la producción de tubérculos, y particularmente críticos en áreas con periodos de crecimiento reducidos, ya que ésta etapa se promueve en condiciones de fotoperíodo corto y temperatura fresca (18 °C), ya que se activa una señal transmisible en la región subapical del estolón que inicia la división celular, la expansión y el cambio de orientación del crecimiento de células, lo que resulta en la formación del tubérculo.

4.9.2 Unidades calor

De acuerdo a la UCANR (2016) la cantidad total de calor requerida, entre los umbrales inferior y superior, para que un organismo se desarrolle de un punto a otro en su ciclo de vida se calcula en unidades denominadas grados-día (° D). A veces llamadas unidades calor, los grados-día son el producto acumulado del tiempo y la temperatura entre los umbrales de desarrollo de cada día. Un grado-día es un día (24 horas) con la temperatura por encima del umbral de desarrollo inferior en un grado.

Cada etapa de desarrollo de un organismo tiene su propio requerimiento total de calor. El desarrollo se puede estimar acumulando grados-día entre los umbrales de temperatura a lo largo de la temporada. Cada especie requiere un número definido de grados-día para completar su desarrollo. Los grados-día acumulados desde un punto de partida pueden ayudar a predecir cuándo se alcanzará una etapa de desarrollo. La fecha para comenzar a acumular días-grado, conocida como fecha de biofijación, varía según la especie. Las fechas de Biofix generalmente se basan en eventos biológicos específicos, como fechas de siembra, captura de la primera trampa o primera aparición de una plaga.

Para calcular las unidades calor (UC) se puede utilizar el método residual con una temperatura base, la precisión del método empleado depende en que las temperaturas registradas estén en el intervalo delimitado por las temperaturas umbrales, expresado en la siguiente fórmula.

$$UC = \frac{t_{max} + t_{min}}{2} - t_{base}$$

Donde:

UC: unidades calor

Tmax: temperatura máxima

Tmin: temperatura mínima

Tbase: temperatura base del cultivo

4.10 Rendimiento

La tuberización en el cultivo de papa es el resultado de la disponibilidad de fotosintatos y de la habilidad para acumularlos en el tubérculo. El rendimiento involucra diversos procesos fisiológicos y son afectados por el componente genotipo, el ambiental y la interacción genotipo-ambiente (Milton y Allen, 1995).

De acuerdo con Arsenault y Cristie (2004), caracteres como el tamaño de la semilla tubérculo y la edad fisiológica utilizada en la siembra, están estrechamente relacionados con el rendimiento y sus componentes en diversos genotipos de papa. Sin embargo, en otros estudios se señala que el uso de semilla tubérculo con diferente tamaño no afecta el rendimiento, siempre que durante el desarrollo inicial del cultivo existan buenas condiciones ambientales (Allen *et al.*, 1992).

El rendimiento fisiológico en el cultivo de papa involucra tres etapas. En la primera, que es la brotación, las ramas emergen de la semilla tubérculo, la segunda ocurre con el inicio de tuberización o formación del tubérculo y finalmente en la tercera, existe crecimiento activo del tubérculo y alcanzan la madurez fisiológica, y en la que el número de ramas por tubérculo, tubérculos por rama y peso de éstos, son los caracteres que fijan la producción (Zvomuya y Rosen, 2002).

En otras investigaciones, se reporta que el uso de semilla-tubérculo con mayor peso puede generar mayor número de ramas y tubérculos por planta (Arsenault y Cristie, 2004), componentes que pueden ser de interés para estimar el rendimiento de las plantas (Lynch *et al.*, 2001). Sin embargo, el incremento en el número de ramas por planta puede ocasionar una disminución el rendimiento, ya que se aumenta el número de tubérculos pequeños (Iritani *et al.*, 1983).

4.11 Variedades de papa

Las principales variedades que se cultivan en la república mexicana según INIFAP (2014) son:

Adora. Esta variedad se adapta a zonas de sierras y Valles Altos de México; requiere de una nutrición abundante y balanceada para alcanzar buen rendimiento. Es una de las variedades que más tardan en platearse, tolerante al daño por vectores y no tolera el calor. Tiene buena aceptación en el mercado.

Ágata. Prácticamente se adapta a todas las regiones de papa en México, con buen rendimiento, calidad y aceptación en el mercado, Tiene el inconveniente de que cuando se cosecha en condiciones de alta temperatura, su vida de anaquel se reduce. Sus requerimientos nutricionales son altos para expresar su potencial de rendimiento. Puede adaptarse a condiciones de alta temperatura al momento de la siembra.

Alpha. Esta variedad sigue siendo la de mayor adaptabilidad a todas las zonas productoras de México; se utiliza tanto para consumo en fresco como para la industria. Su rendimiento es bueno; sin embargo, mantener la calidad que exige el mercado es cada vez más difícil. Esta variedad es la que resiste mejor en manejo de postcosecha y tiene una buena vida de anaquel. Su aceptación en el mercado es buena.

Ambra. Actualmente es una de las variedades de mayor preferencia en el mercado por sus características de la calidad y manejo postcosecha, con buena adaptación a la mayoría de las regiones productoras. Debido a la falta de semilla y delicadeza para el manejo de la misma, el aumento en la superficie sembrada no ha sido tan acelerado. Cuando la semilla no es bien manejada, el rendimiento se reduce.

Atlantic. Es la variedad de mayor demanda por la industria. Se siembra principalmente en Sinaloa, Sonora, Chihuahua y en menor escala en las sierras y Valles Altos.

Caesar. Su mayor adaptación es a las condiciones de sierras, valles altos y Baja California Sur, con buen rendimiento, calidad y vida de anaquel. Tiene el inconveniente de que no tolera el almacenamiento prolongado a bajas temperaturas, por lo que se siembra muy poco en otras regiones productoras. Su cultivo requiere de altas dosis de fertilización y se adapta bien a condiciones calurosas.

Fábula. Es una de las variedades más rendidoras en las diferentes zonas productoras, y resiste el verdeo en el almacenamiento, aunque tiene el inconveniente que se deshidrata rápidamente. Para expresar su potencial de rendimiento requiere de altas dosis de fertilizante. En fecha de siembras tardías con condiciones calientes y por la coloración del follaje es altamente atacada por insectos vectores de virus, tizón temprano y pudrición seca, principalmente.

Fianna. Actualmente es la que ocupa mayor superficie sembrada en el país, por su adaptación a las diferentes regiones productoras, rendimiento, calidad y preferencia tanto para el mercado en fresco como para la industria de las papas fritas, sobre todo artesanal. Tiene el inconveniente de que es tardía, y en zonas con alta presencia de insectos vectores de enfermedades pueden llegar a perder sus atributos. Resiste el almacenamiento a bajas temperaturas por tiempo prolongado.

Gigant. Se adapta bien a todas las regiones productoras y es de buen rendimiento. Sin embargo, por el deterioro de su calidad y su corta vida de anaquel, han provocado su rechazo en el mercado, por lo que cada año se reduce la superficie de siembra.

Vivaldi. Es rendidora en diferentes zonas, sobre todo en los estados de Veracruz y baja california sur. Su aceptación en el mercado local es buena. Tiene el inconveniente que por la coloración del follaje es susceptible al ataque de insectos vectores de enfermedades, tizón temprano y pudrición seca, sobre todo cuando le falta humedad durante el ciclo de crecimiento.

4.12 Aeroponía

La palabra aeroponía se deriva de los términos griegos *aero* (aire) y *ponos* (trabajo). La aeroponía es una técnica de cultivo moderno, por medio de la cual una planta se desarrolla en un entorno aéreo, las sustancias nutritivas para su adecuado crecimiento se obtienen de un sistema de aspersión continua de nutrientes, aplicados directamente a la raíz de la planta, sin hacer uso del suelo y sin estar sumergida en ningún tipo de sustrato (Vázquez, 2012).

El principio básico de la aeroponía es que es un método seguro y ecológico para la producción de plantas y cultivos saludables, el cual permite mayor acceso al oxígeno, y en hacer crecer a las plantas en un medio o entorno cerrado, semi cerrado o al descubierto,

regado con una solución rica en nutrimentos a las raíces que se encuentran suspendidas en el aire, las cuales se sostienen con diversas estructuras de conducción o de apoyo, que funcionan como sostén del tallo de la planta con hilo de rafia o alambre que sostiene el follaje y el peso de los frutos del cultivo que se trate (Rendon, 2013).

4.12.1 Importancia de la aeroponía

La aeroponía tiene como propósito eficientizar el uso de agua, nutrientes y en general el suministro de agroinsumos sin poner en riesgo la producción. En la actualidad el agua es un factor de gran importancia en el mundo, toda vez que las grandes reservas de aguas superficiales y mantos acuíferos subterráneos se están abatiendo y que su recuperación podría tardar muchos años, en ese sentido, la aeroponía permite aportar de forma precisa y eficiente la cantidad de agua y elementos nutritivos que necesita la planta en cada fase de su desarrollo, sin repercusiones significativas en la producción de los cultivos (Rendon, 2013).

4.12.2 Ventajas

La producción en los sistemas aeropónicos reduce la incidencia de enfermedades ocasionadas por hongos y bacterias, se mantiene un crecimiento constante, el sistema radical es más vigoroso y de mayor crecimiento, además, se puede producir fuera de época, de manera intensiva y alimentos de mejor calidad, situación que dista de la producción bajo condiciones de agricultura tradicional con suelos de calidad deficiente, texturas inadecuadas para la agricultura, nutrientes deficientes y alta incidencia de plagas y enfermedades (Vázquez, 2012).

4.12.3 Desventajas

Entre las principales desventajas se encuentran la necesidad de contar con una mejor y continúa supervisión, y eficiente mantenimiento de los sistemas ya que en el caso del riego, podría ocurrir taponamiento de los nebulizadores, lo que podría afectar a las raíces de las plantas por la falta de agua y nutrimentos. Así mismo, los nebulizadores son

susceptibles a deficiencias en el sistema eléctrico y al presentar una falla podrían dejar de funcionar, lo que puede provocar severos daños o la muerte del cultivo (Otazú, 2010).

El trabajar en sistemas aeropónicos resulta costoso y demanda un cierto grado de conocimiento en aspectos de programación de riego y de soluciones nutritivas, ya que el desconocimiento de éstos puede afectar de manera significativa la producción. En aeroponía es necesario un mecanismo de apoyo para sostener a las plantas, ya que al no contar con un medio como es el suelo o sustrato que permita el anclaje del sistema radicular, se podrían presentar defectos en el desarrollo, además de que la falta de cuidado en la higiene en la raíz podría favorecer el desarrollo de hongos, algas y bacterias (Pérez, 2012).

4.12.4 Aeroponía en papa

Wheathers *et al.* (1992) encontraron que la principal diferencia de la aeroponía y la hidroponía, es la aplicación de la solución nutritiva en forma de niebla, pudiendo utilizar esta técnica en la producción de vitroplantas, cultivos celulares y microbianos.

Ritter *et al.* (2001) al comparar la producción de mini tubérculos de papa en el sistema de cultivo aeropónico y el hidropónico bajo condiciones de invernadero, encontraron que el crecimiento vegetativo y rendimiento de tubérculos por planta fue en el sistema aeropónico 70 % mayor que el hidropónico.

Farran y Mingo (2006) estudiaron la producción de mini tubérculos semilla de papa en un sistema aeropónico a densidades de 60 y 100 plantas·m⁻², con intervalos de cosecha de 7,10, y 14 días después del inicio de tuberización. Los resultados indicaron que los mejores rendimientos se obtuvieron a una densidad de siembra de 60 plantas·m⁻², cosechados cada 7 días, con una producción de 800 mini tubérculos por m², mostrando un rendimiento total de 118.6 g·planta⁻¹.

En condiciones de aeroponía, la producción de papa se ha orientado a la obtención de mini tubérculos semilla, probando densidades de siembra, intervalos de cosecha (Farran y Mingo-Castel, 2006; Muthoni *et al.*, 2011; Mbiyu *et al.*, 2012), evaluación de variedades y estudios de calidad (Chiipanthenga *et al.*, 2012), y cuyos resultados han mostrado que a menores densidades el número de tubérculos por planta y peso de éstos es mayor (CIP, 2008), aunque el peso promedio de cada tubérculo fue similar independientemente del

número de plantas por unidad de superficie evaluadas. Asimismo, la calidad de los tubérculos producidos mediante aeroponía es mejor que aquellos obtenidos a través los métodos tradicionales (Chiipanthenga *et al.*, 2012).

La aeroponía podría ofrecer solución al problema de escasez de tubérculo semilla certificada en países como Kenia o en América Latina, sin embargo, el sistema necesita una evaluación adicional y completa en términos de productividad, rentabilidad y sostenibilidad. Además, se requiere de un análisis comparativo de costos entre aeroponía y métodos convencionales, en términos de costo por tubérculo (Muthoni *et al.*, 2011).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización del sitio experimental

El módulo de aeroponía se instaló en la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias (Figura 1), de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ubicada en San Juan Acateno perteneciente al municipio de Teziutlán en el estado de Puebla. Localizada en la Sierra Madre del Este, con coordenadas $19^{\circ}52'33''$ Latitud Norte, $97^{\circ}21'45''$ Longitud Oeste y a 1668 msnm. Se estableció durante los meses de diciembre de 2019 a marzo de 2020, bajo condiciones de invernadero.

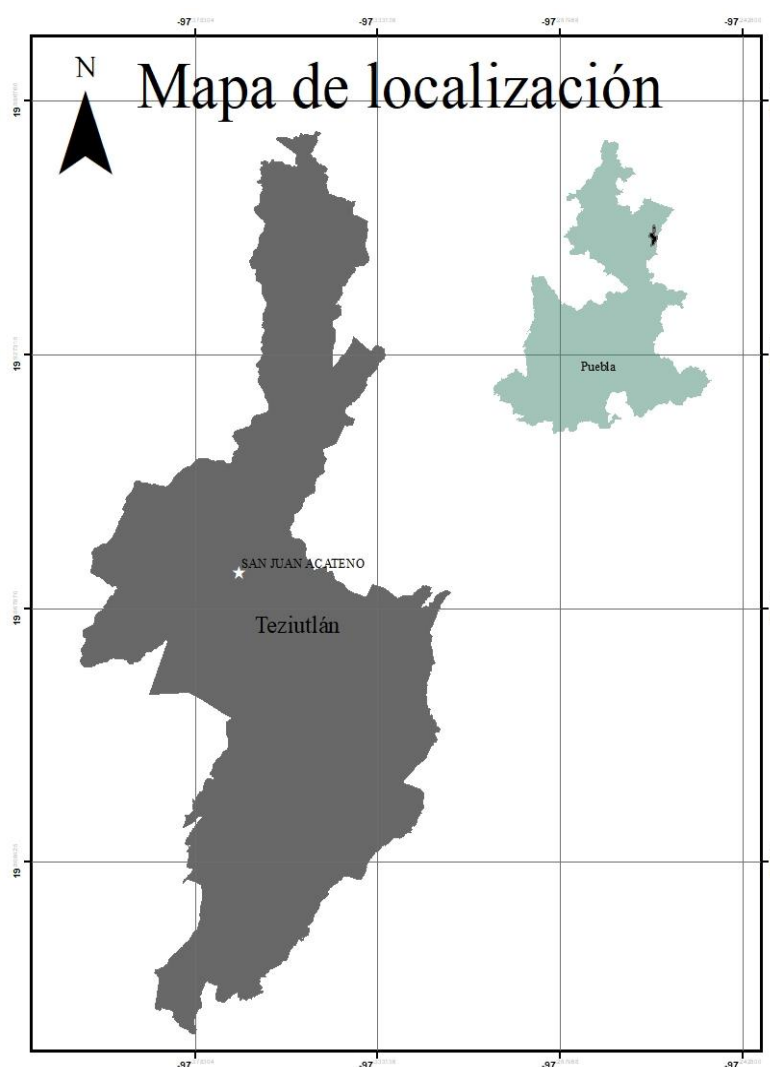


Figura 1. Mapa de localización

5.2 Módulo de aeroponía

Se construyó un módulo de aeroponía con medidas de 2.50 x 1.00 x 1.20 m de largo, ancho y alto (Figura 2), respectivamente, a base de madera. Se colocaron placas de unicel de 0.5 x 1 m y 5 cm de espesor como soporte de las plantas. El soporte de unicel se cubrió con plástico bicolor para acolchado, la parte interior con plástico color negro mientras que la parte exterior con gris. El módulo se mantuvo en condiciones de oscuridad durante toda la investigación, para ello se utilizó plástico negro.

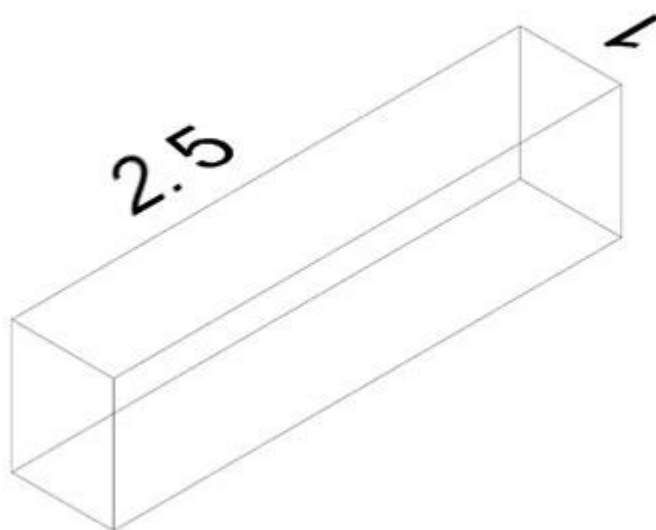


Figura 2. Medidas módulo de aeroponía

Se realizaron agujeros de 6 cm de diámetro en el soporte de unicel. Los agujeros se realizaron de acuerdo a la densidad de plantación (16 y 26 m²). Adicionalmente, se utilizaron pelotas de unicel cortadas por la mitad para sostener a las plantas en el momento del trasplante.

Para el drenaje y recirculación de la solución nutritiva, se colocó plástico negro en la parte interna del módulo con una inclinación hacia un lado en donde se realizó una perforación al plástico. La colecta de la solución se realizó mediante un contenedor de plástico con capacidad de almacenamiento de 100 L. Todo el exterior del módulo se cubrió por placas de unicel para disminuir la cantidad de luz dentro de éste y se diseñaron ventanas de 0.25 x 0.25 m para observar el crecimiento de la raíz y de los tubérculos.

Se colocaron postes de madera de 1m de altura en las cuatro esquinas del módulo, sobre el soporte de unisel para realizar el tutoreo de las plantas. El sistema de riego incluyó una bomba de 0.5 HP conectada al tanque de 250 L. El retorno también utilizó una bomba de 0.5 HP. Ambas bombas estuvieron conectadas a un temporizador. Además, en el riego se utilizaron dos líneas de manguera negra de 16 mm, seis aspersores y cuatro nebulizadores

5.3 Material vegetal

Se utilizaron las variedades de papa Fiana y Ágatha como materiales genéticos, las cuales se caracterizan por tener un ciclo biológico de 90 a 120 días de siembra a cosecha. Se utilizó en la siembra semilla tubérculo en estado fisiológico de dominancia apical (un brote).

Se utilizaron 15 tubérculos por variedad. Con pesos promedios de 30 ± 2 g y de 7 ± 2 g, los cuales fueron establecidos en bolsas de polietileno color negro con capacidad de 6 litros, cuatro tubérculos por bolsa. El sustrato utilizado estuvo compuesto por la mezcla de peat moss – perlita (1:1 v/v). El riego se realizó de manera manual, a capacidad de campo y de manera periódica según las necesidades hídrica.

5.4 Manejo del cultivo

5.4.1 Trasplante en el módulo de aeroponía

Una vez que las plantas de las dos variedades tuvieron una altura de 15 a 20 cm, se colocaron en el módulo de aeroponía, para ello, se removió con cuidado el sustrato de las raíces y se separaron entre sí las plantas, cuidando de no dañar y perder raíces, manteniendo el tubérculo madre. Se establecieron 15 plantas de las variedades Fiana y Ágatha para la densidad de población de $26 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$, y 9 de Fiana y Ágatha para la densidad de plantación de $16 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$.

5.4.2 Tutorado y podas

El tutoreo se llevó a cabo durante la primera semana después del trasplante y se realizó colocando alambre en forma de cuadrícula entre los postes, posteriormente se realizó lo mismo con rafia para ir guiando a las plantas.

Se realizaron podas de hojas dañadas, enfermas y amarillas que tuvieron contacto con la superficie del módulo, y para mantener la aireación en la parte inferior de las plantas.

5.4.3 Monitoreo y control de plagas y enfermedades

Para prevenir la incidencia de plagas se realizó control de la maleza dentro del invernadero, y el monitoreo de la sanidad de las plantas se llevó a cabo de manera visual.

5.4.4 Fertilización y riego

La fertilización se realizó en el riego, para ello cada 15 días se prepararon 250 L de solución nutritiva, agregando 500 g de fertilizante soluble (20-5-5) en la primera solución después del establecimiento. En las siguientes soluciones se aplicaron 250 g de los fertilizantes solubles 20-5-5 y 7-12-40+2. La fertilización se complementó con aplicaciones foliares de microelementos a razón de $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ cada 8 días.

El riego se realizó por periodos (Cuadro 2), el primero comprendió desde el trasplante hasta 10 días después del trasplante (DDT), el segundo de los 10 a los 30 DDT y el último periodos del día 30 hasta la culminación de la investigación (76 DDT).

Cuadro 2. Riego por etapas

PERIODO 1		PERIODO 2		PERIODO 3	
INICIO	FIN	INICIO	FIN	INICIO	FIN
08:00	08:15	08:00	08:15	08:00	08:15
10:00	10:15	09:30	09:45	09:00	09:15
12:00	12:15	11:00	11:15	10:00	10:15
14:00	14:15	12:30	12:45	11:00	11:15
16:00	16:15	14:00	14:15	12:00	12:15
18:00	18:15	15:30	15:45	13:00	13:15
20:00	20:15	17:00	17:15	14:00	14:15
02:00	02:15	18:30	18:45	15:00	15:15
		20:00	20:15	16:00	16:15
		21:30	21:45	17:00	17:15
		02:00	02:15	18:00	18:15
				19:00	19:15
				20:00	20:15
				21:00	21:15
				22:00	22:15
				02:00	02:15

5.5 Parámetros evaluados

Se determinó el número de grados día (GD) en cada etapa fenológica a partir del establecimiento de las plantas en el sistema aeropónico en cada tratamiento con el método residual, para ello, a la temperatura media diaria se le resto la temperatura base del cultivo de 6 °C (Cao y Tibbits, 1995), y para lo cual se determinaron durante todo el ciclo de cultivo las temperaturas máxima y mínima del aire (°C), mediante un termómetro digital marca Davis modelo Vantage Pro 2

5.5.1 Grados día a estoloneo

Se consideró como el instante en que apareció el estolón en el tallo principal de las plantas.

5.5.2 Grados día a inicio de tuberización

Se determinó en el momento en que ocurrió el engrosamiento del ápice del estolón de las plantas.

5.5.3 Grados día a madurez fisiológica

Se determinó en el momento en que sucedió la máxima acumulación de la materia seca acompañada de la senescencia del follaje.

5.5.4 Número de tubérculos por planta

Se determinó en cada unidad experimental, para ello, se separaron todos los tubérculos del tallo principal.

5.5.5 Peso de tubérculos por planta

Se determinó en cada unidad experimental y se consideraron todos los tubérculos libres de tierra y partes del estolón.

5.5.6 Peso promedio de tubérculo

Se obtuvo al dividir el peso de tubérculos por planta entre el número de tubérculos por planta.

5.5.7 Altura de planta

Se realizó en la madurez fisiológica de las plantas, y se midió desde la base del tallo principal hasta el ápice de la última hoja.

5.5.8 Longitud de raíz

Se consideró desde la base del tallo hasta la punta de la raíz.

5.5.9 Diámetro de tallo

Se determinó en la madurez fisiológica de la planta, en la base del tallo principal mediante un calibrador vernier digital ESTEREN modelo HER-411.

5.5.10 Peso seco de la parte aérea.

Consideró el peso seco de hojas y tallos, para ello, las diferentes partes de la planta se colocaron en bolsas de papel y se llevaron a una estufa de secado Dry Big modelo 2002961, donde estuvieron 72 h a 75 °C, hasta peso constante.

5.5.11 Peso seco de la parte radicular

Comprendió a la raíz y parte del estolón, las cuales se colocaron en bolsas de papel y se llevaron a una estufa de secado donde estuvieron 72 h a 75 °C, hasta peso constante.

5.5.12 Peso seco total

Se obtuvo al sumar el peso seco de la parte aérea y el peso seco de la parte radicular.

5.6 Diseño experimental

La investigación se estableció bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2^3 , los factores fueron variedades, densidades de plantación y tamaño de la semilla-tubérculo (Cuadro 3).

El factor variedad contó con los niveles Fianna y Ágatha, el factor densidades de plantación con los niveles 15 y 26 plantas·m⁻² y el factor tamaño de la semilla tubérculo con los pesos 30 ±2 y 7 ±2 g.

Cuadro 3. Tratamientos evaluados

Tratamientos	Factores		
	Variedad	Densidad (plantas·m ⁻²)	Tamaño (g)
1	Fianna	16	5
2	Fianna	16	25
3	Fianna	26	5
4	Fianna	26	25
5	Ágatha	16	5
6	Ágatha	16	25
7	Ágatha	26	5
8	Ágatha	26	25

5.7 Análisis estadístico

Al final de la investigación, todas las variables respuesta fueron analizadas estadísticamente mediante análisis de varianza y comparaciones múltiples de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), con el paquete Statistical Analysis System (SAS).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Temperatura

La temperatura del aire en el área circúndate al módulo aeropónico dentro del invernadero fue fluctuante durante el ciclo de cultivo (Figura 3). La temperatura máxima registrada fue de 27 °C y la mínima de 7 °C, las que fueron similares a las reportadas por Mateus-Rodríguez *et al.* (2014) es sus investigaciones sobre interacción genotipo por ambiente en la producción de minitubérculos de papa en aeroponía, y que en el presente trabajo coincidieron con las etapas de tuberización y madurez fisiológica de tubérculo. La temperatura media varió entre los 14 y 18 °C, valores que se encuentran dentro del rango reportado por Andrade-Piedra *et al.* (2015), y quienes indican que a esas temperaturas en los 15 a 30 días después del establecimiento de las plantas en el sistema, se evita la deshidratación del follaje. Además de que también en condiciones cercanas a los 20 °C (Cao y Tibbits, 1994), ocurre la mayor producción de biomasa y de tubérculos.

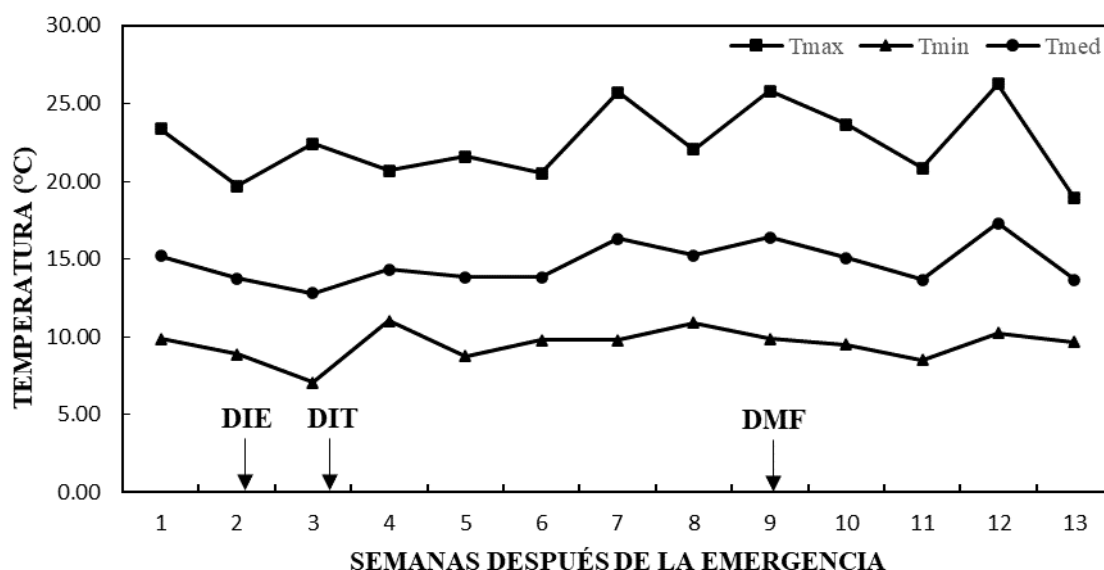


Figura 3. Temperaturas del aire registradas en el exterior del módulo aeropónico en condiciones de invernadero. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020. Las flechas indican los días de inicio de estoloneo (DIE), tuberización (DIT) y madurez fisiológica del tubérculo (DMF). Valores promedio de dos variedades.

6.2 Análisis de varianza de la fenología, rendimiento y biomasa

Los análisis de varianza de todos los caracteres estudiados indicaron que con excepción de las variables altura de planta (ALP) y peso promedio de tubérculo (PPT) en el factor variedades de papa (FA), grados día a inicio de estoloneo (GDIE), tuberización (GDIT) y madurez fisiológica del tubérculo (GDMF), ALP, longitud de raíz (LOR), número de estolones por planta (NEP), número de tubérculos por planta (NTP), PPT, peso seco de la parte radicular (PSR) y total (PST) en el factor densidad de plantación (FB), y GDIE, GDIT y PPT en el factor tamaño de la semilla tubérculo (FC), las demás variables mostraron efectos significativos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables fenológicas, de rendimiento y biomasa en el cultivo de papa, producidas en aeroponía. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

VARIABLE	FUENTES DE VARIACIÓN								
	FA	FB	FC	FA*FB	FA*FC	FB*FC	FA*FB*FC	ERROR	CV (%)
GDIE	3128.16**	48.16 ^{ns}	48.16 ^{ns}	6.00*	6.00*	16.66 ^{ns}	28.16*	59.50	6.43
GDIT	4816.66**	0.66 ^{ns}	0.66 ^{ns}	28.16*	28.17*	0.16 ^{ns}	0.00*	21.50	3.14
GDMF	4565.04**	234.37 ^{ns}	5612.04**	459.37*	4732.04**	70.04*	108.37*	58.70	1.31
ALP (cm)	9.25 ^{ns}	0.35 ^{ns}	344.28**	6.30 ^{ns}	27.09*	57.35*	21.85*	8.70	10.82
LOR (cm)	937.50**	19.44 ^{ns}	104.16*	24.00*	201.84**	11.20 ^{ns}	52.80*	22.54	14.99
GRT (mm)	7.26**	4.16**	7.48**	0.28*	0.24*	0.96*	0.28*	0.41	11.07
NEP	182.25**	4.00 ^{ns}	132.25**	42.25*	100.00**	2.25*	16.00*	8.00	26.31
NTP	19.12**	1.48 ^{ns}	10.44*	0.73*	0.58*	4.84*	30.61**	1.46	20.15
PTP (g)	112.27 ^{ns}	1231.01**	3500.26**	753.88*	2086.64**	1693.7**	524.74*	107.06	31.65
PPT (g)	0.68 ^{ns}	7.45 ^{ns}	20.93 ^{ns}	4.30 ^{ns}	0.18 ^{ns}	73.53**	3.15 ^{ns}	6.41	36.40
PFA (g)	250.43**	293.25**	131.67**	395.01**	23.28*	46.58*	91.06**	4.35	12.41
PFR (g)	753.50**	748.02**	668.22**	519.84**	660.49**	376.36**	355.32**	7.31	17.85
PFT (g)	1061.13**	1449.70**	1223.25**	1103.90**	606.39**	631.26**	491.73**	11.43	12.71
PSA (g)	2.97**	0.68**	4.51**	0.14*	2.17**	0.10*	0.22*	0.03	10.98
PSR (g)	1.69**	0.16 ^{ns}	1.32**	0.00*	0.30*	0.00*	0.06*	0.07	25.42
PST (g)	5.17**	0.22 ^{ns}	7.98**	0.10*	2.03**	0.60*	1.62**	0.08	11.28

^{ns}; *, **: No significativo y significativo a una $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente.

CV: Coeficiente de variación.

FA: variedades de papa; FB: densidad de plantación; FC: tamaño de semilla tubérculo; GDIE: grados día a inicio de estoloneo; GDIT: grados día a inicio de tuberización; GDMF: grados día a madurez fisiológica del tubérculo; ALP: altura de planta; LOR: longitud de raíz; GRT: grosor de tallo; NEP: número de estolones por planta; NTP: número de tubérculos por planta; PTP: peso de tubérculos por planta; PPT: peso promedio de tubérculos por planta; PFA: peso fresco de la parte aérea; PFR: peso fresco de la parte radicular; PFT: peso fresco total; PSA: peso seco de la parte aérea; PSR: peso seco de la parte radicular; PST: peso seco total.

Un comportamiento similar se observó con las diferentes interacciones, ya que con excepción de las variables ALP y PPT en la interacción FA*FB, el PPT en las interacciones FA*FC y FA*FB*FC, y el número de GDIE, GDIT y PPT en la interacción FA*FB, el resto de las variables mostraron también efectos significativos. Estos resultados

indican que la densidad de plantación (Farran y Mingo-Castel, 2006) y el tamaño o estado de madurez de la semilla tubérculo (Morales *et al.*, 2011) afectaron el comportamiento de las variedades.

6.3 Análisis de los factores principales en la fenología, rendimiento y biomasa

El comportamiento de las variables fenológicas, de rendimiento y acumulación de materia seca fue diferencial entre los factores variedades, densidades de población y tamaño de semilla tubérculo (Cuadro 5). En el factor variedades, Fianna tuvo un ciclo de cultivo más largo ($P \leq 0.05$) que Ágata, debido a que necesitó un mayor número de grados día en la etapa de estoloneo (GDIE) y tuberización (GDIT), lo que se reflejó en una mayor acumulación de peso fresco (PFA) y seco (PSA) de la parte aérea, peso fresco (PFR) y seco (PSR) de la parte radicular, y peso fresco (PFT) y seco (PST) total. Estos resultados indican que una mayor duración en el inicio de la ocurrencia de las etapas fenológicas, repercute en una mayor duración del ciclo biológico del cultivo, lo que concuerda con lo reportado por Morales *et al.* (2011).

El número de tubérculos por planta (NTP) fue 29 % mayor en la variedad Fianna que en Ágata, sin embargo, el peso promedio de tubérculos por planta (PPT) fue similar entre variedades, lo que se reflejó también en el mismo peso de tubérculos por planta (PTP), ya que según Zvomuya y Rosen (2002), el PPT es uno de los principales componentes que definen el rendimiento.

En el factor densidad de plantación, en general, la fenología (GDIE, GDIT y GDMF), la ALP, LOR, los componentes del rendimiento (NEP, NTP y PPT) y el PSR, fueron estadísticamente similares entre las dos densidades. Sin embargo, el PPT fue 42 % mayor en la densidad de 16 plantas·m⁻² que en la de 26 plantas·m⁻², resultados que concuerdan con lo reportado por Farran y Mingo-Castel (2006), quienes obtuvieron un mayor rendimiento de papa en un sistema aeropónico a densidades menores, y que pudo ser debido a que las plantas a mayores densidades, pueden competir significativamente por la cantidad de luz.

Un comportamiento similar se observó con las variables PFA, PFT y PSA, ya que los mayores valores ($P \leq 0.05$) se obtuvieron con la densidad de 16 plantas·m⁻².

Cuadro 5. Fenología, rendimiento y materia seca en los factores variedades, densidad de plantación y tamaño de la semilla tubérculo del cultivo de papa. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

VARIABLE	VARIEDADES			DENSIDAD DE PLANTACIÓN (PLANTAS·m ⁻²)			TAMAÑO DE LA SEMILLA TUBÉRCULO (g)		
	FIANNA	ÁGATA	DMSH	16	26	DMSH	5	25	DMSH
GDIE	131.251a ^z	108.41b	6.67	121.25a	118.41a	6.67	121.25a	118.41a	6.67
GDIT	161.41a	133.08b	4.01	147.41a	147.08a	4.01	147.41a	147.08a	4.01
GDMF	594.66a	567.08b	6.63	584.00a	577.750a	6.63	596.16a	565.58b	6.63
ALP (cm)	27.88a	26.64a	2.55	27.38a	27.14a	2.55	31.05a	23.47b	2.55
LOR (cm)	37.91a	25.41b	4.1	32.56a	30.76a	4.1	33.75a	29.58b	4.1
GRT (mm)	6.37a	5.27b	0.55	6.24a	5.40b	0.55	6.38a	5.26b	0.55
NEP	14.12a	7.35b	3.26	11.25a	10.25a	3.26	13.62a	7.87b	3.26
NTP	7.12a	5.00b	1.32	6.22a	5.70a	1.32	6.80a	5.22b	1.32
PTP (g)	35.11a	29.96a	11.37	40.83a	23.52b	11.37	47.23a	19.75b	11.37
PPT (g)	7.16a	6.75a	2.91	7.63a	6.27a	2.91	8.10a	5.81a	2.91
PFA (g)	20.77a	12.86b	2.4	21.10a	12.53b	2.4	19.68a	13.95b	2.4
PFR (g)	22.01a	8.28b	3.11	21.98a	8.31b	3.11	21.61a	8.68b	3.11
PFT (g)	34.75a	18.46b	3.89	36.12a	17.08b	3.89	35.35a	17.86b	3.89
PSA (g)	2.15a	1.28b	0.21	1.92a	1.51b	0.21	2.25a	1.18b	0.21
PSR (g)	1.37a	0.7b	0.3	1.15a	0.95a	0.3	1.33a	0.76b	0.3
PST (g)	3.16a	2.05b	0.33	2.71a	2.47a	0.33	3.30a	1.88b	0.33

^zValores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

GDIE: grados día a inicio de estoloneo; GDIT: grados día a inicio de tuberización; GDMF: grados día a madurez fisiológica del tubérculo; ALP: altura de planta; LOR: longitud de raíz; GRT: grosor de tallo; NEP: número de estolones por planta; NTP: número de tubérculos por planta; PTP: peso de tubérculos por planta; PPT: peso promedio de tubérculos por planta; PFA: peso fresco de la parte aérea; PFR: peso fresco de la parte radicular; PFT: peso fresco total; PSA: peso seco de la parte aérea; PSR: peso seco de la parte radicular; PST: peso seco total.

En el tamaño de la semilla tubérculo, el ciclo biológico fue mayor ($P \leq 0.05$) en el de 5 g que en el de 25 g, lo que se vio reflejado en una mayor ALP, LOR, GRT, NEP, PFA, PFR, PFT, PSA, PSR y PST.

El PPT fue 58 % mayor en la semilla de 5 g que en la de 25 g, lo que indica que independientemente del tamaño de la semilla tubérculo empleada durante la siembra, la edad fisiológica de ésta (Wiersema, 1985) y el estado de madurez (Morales *et al.*, 2011), son dos de los parámetros que pueden influenciar el rendimiento de papa.

6.4 Análisis de los efectos de interacción en la fenología, rendimiento y biomasa

6.4.1 Interacción variedad*densidad de población

El análisis conjunto de variedad por densidad de población indicó que Fianna con 26 plantas por m^{-2} , tuvo el ciclo de cultivo más largo ($P \leq 0.05$) en comparación con los demás tratamientos (Cuadro 6), lo que se reflejó en un mayor número de GDIE, GDIT y GDMF, y que concuerda con lo reportado por Morales *et al.* (2011) al indicar que el tiempo en la ocurrencia de las etapas fenológicas, puede afectar la duración del ciclo biológico de las plantas. También tuvo el mayor rendimiento expresado en PTP, ya que supero en 44 % a los demás tratamientos, acompañado de una mayor acumulación de PFA, PFR y PFT, lo que indica la importancia de la biomasa en el rendimiento (Kleinkopf, 1983) y que concuerda con lo reportado por Morales *et al.* (2011) al indicar que el mayor rendimiento la variedad Mondial se debió a una mayor acumulación de materia seca aérea.

Cuadro 6. Comportamiento de la fenología, rendimiento y biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

VARIEDAD	DENSIDAD DE	ALP	LOR	GRT	GDIE	GDIT	GDMF	NEP	NTP
----------	-------------	-----	-----	-----	------	------	------	-----	-----

	PLANTACIÓN (PLANTAS·m ⁻²)	(cm)	(cm)	(mm)					
FIANNA	16	27.25a ^z	38.01a	5.85ab	106.50a	132.16b	587.16b	6.23b	4.00b
FIANNA	26	28.51a	37.81a	6.90a	110.33b	134.00b	602.16a	8.50b	5.80ab
ÁGATA	16	27.03a	23.51b	4.96b	130.33a	162.66a	568.33c	16.25a	7.50a
ÁGATA	26	26.25a	27.31b	5.58b	132.167a	160.16a	565.83c	12.00ab	6.75a
DMSH		4.87	7.84	1.06	12.74	7.65		6.40	2.60
		PTP (g)	PPT (g)	PFA (g)	PFR (g)	PFT (g)	PSA (g)	PSR (g)	PST (g)
FIANNA	16	19.35b	5.55a	11.52b	9.47b	16.92b	1.85b	1.30a	3.12a
FIANNA	26	47.72a	7.95a	30.02a	34.55a	52.56a	1.45a	1.45a	3.20a
ÁGATA	16	27.70ab	7.00a	13.55b	7.15b	17.25b	1.17c	0.60b	1.82b
ÁGATA	26	32.22a b	7.32a	12.17b	9.42b	19.67b	1.40c	0.85ab	2.22b
DMSH		4.21	5.73	4.72	6.12	7.65	0.42	0.60	0.66

^zValores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

ALP: altura de planta; LOR: longitud de raíz; GRT: grosor de tallo; GDIE: grados día a inicio de estoloneo; GDIT: grados día a inicio de tuberización; GDMF: grados día a madurez fisiológica del tubérculo; NEP: número de estolones por planta; NTP: número de tubérculos por planta; PTP: peso de tubérculos por planta; PPT: peso promedio de tubérculos por planta; PFA: peso fresco de la parte aérea; PFR: peso fresco de la parte radicular; PFT: peso fresco total; PSA: peso seco de la parte aérea; PSR: peso seco de la parte radicular; PST: peso seco total.

6.4.2 Interacción variedad*tamaño de semilla

La respuesta del factor variedades por tamaño de semilla tubérculo indicó que Fianna con 25 g tuvo significativamente el ciclo biológico más largo que los otros tratamientos (Cuadro 7), ya que requirió en promedio 56 grados día más, asimismo, se acompañó de un mayor GRT y LOR, lo que pudo ser debido a una rápida presencia de primordios de raíz durante la brotación del tubérculo y por lo tanto un gran desarrollo de ésta durante el desarrollo de la planta (Andrade-Piedra *et al.*, 2015).

El PPT fue en promedio 59 % mayor en Fianna con semilla tubérculo de 25 g que en los demás tratamientos, también, éste mismo tratamiento tuvo en general una mayor biomasa fresca y seca (PFA, PFR, PFT, PSA, PSR y PST), lo que indica la importancia de este carácter en el rendimiento de papa (Kleinkopf, 1983).

Cuadro 7. Comportamiento de la fenología, rendimiento y biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

VARIEDAD	TAMAÑO DE SEMILLA (g)	ALP (cm)	LOR (cm)	GRT (mm)	GDIE	GDIT	GDMF	NEP	NTP
FIANNA	5	23.03b ^z	32.93b	5.71b	110.33b	134.00b	565.33b	7.00a	4.20b
FIANNA	25	29.36a	42.90a	7.03a	106.50b	132.16b	624.00a	7.75b	6.00ab
ÁGATA	5	23.91b	26.23bc	4.91b	132.16a	160.16a	565.83b	8.75b	6.50ab
ÁGATA	25	32.73a	24.60 c	5.73b	130.33a	162.66a	568.33b	19.50a	7.75a
DMSH		4.87	7.84	1.06	12.74	7.65	12.65	6.40	2.60
		PTP (g)	PPT (g)	PFA (g)	PFR (g)	PFT (g)	PSA (g)	PSR (g)	PST (g)
FIANNA	5	14.04b	5.50a	16.70b	9.12b	19.85b	1.25b	0.95b	2.10bc
FIANNA	25	61.45a	8.00a	24.85a	34.90a	49.65a	3.05a	1.80a	4.22a
ÁGATA	5	26.90b	6.12a	11.20c	8.25b	15.87b	1.12b	0.57b	1.67c
ÁGATA	25	33.02b	8.20a	14.52bc	8.32b	21.05b	1.45b	0.87b	2.37b
DMSH		4.21	5.73	4.72	6.12	7.65	0.42	0.60	0.66

^zValores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

ALP: altura de planta; LOR: longitud de raíz; GRT: grosor de tallo; GDIE: grados día a inicio de estoloneo; GDIT: grados día a inicio de tuberización; GDMF: grados día a madurez fisiológica del tubérculo; NEP: número de estolones por planta; NTP: número de tubérculos por planta; PTP: peso de tubérculos por planta; PPT: peso promedio de tubérculos por planta; PFA: peso fresco de la parte aérea; PFR: peso fresco de la parte radicular; PFT: peso fresco total; PSA: peso seco de la parte aérea; PSR: peso seco de la parte radicular; PST: peso seco total.

6.4.3 Interacción densidad de plantación*tamaño de semilla

El análisis conjunto de los factores densidad de plantación por tamaño de la semilla tubérculo, indicó que el de 26 plantas·m⁻² con tamaño de 25 g tuvo significativamente un mayor ciclo biológico (GDMF) que el tratamiento de 26 plantas·m⁻² con tamaño de 5 g,

asimismo, presentó una mayor ALP y GRT en comparación con los demás tratamientos (Cuadro 8).

El PPT fue en promedio 67 % mayor en el tratamiento de 26 plantas·m⁻² con tamaño de semilla de 25 g, debido a un mayor NTP y PPT, lo que indica la importancia de estos caracteres en la producción de papa, ya que según Zvomuya y Rosen (2002), el número y peso promedio de tubérculos por planta, son dos de los componentes que definen el rendimiento final. También, fue el tratamiento que presentó los mayores valores ($P \leq 0.05$) de PFA, PFR, PFT y PSR con respecto a los otros tratamientos.

Cuadro 8. Comportamiento de la fenología, rendimiento y biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

DENSIDAD DE PLANTACIÓN (PLANTAS·m ⁻²)	TAMAÑO DE SEMILLA (g)	ALP (cm)	LOR (cm)	GRT (mm)	GDIE	GDIT	GDMF	NEP	NTP
16	5	24.90bc	29.36a ^z	5.93b	119.00a	147.16a	564.16a	8.00b	5.50ab
16	25	29.38ab	32.16a	5.76b	117.83a	147.167a	591.33a	14.50a	6.00ab

26	5	22.05c	29.80a	5.48b	123.5a	147.00a	567.00b	7.75b	5.00b
26	25	32.71a	35.33a	7.00a	119.00a	147.16a	601.00a	12.75ab	7.75a
DMSH		4.87	7.84	1.06	12.74	7.65	12.65	6.40	2.60
		PTP (g)	PPT (g)	PFA (g)	PFR (g)	PFT (g)	PSA (g)	PSR (g)	PST (g)
16	5	19.82b	7.27ab	11.37c	6.70b	14.62b	0.90c	0.65b	1.57b
16	25	27.22b	5.27ab	13.70bc	9.92b	19.55b	2.12a	1.25ab	3.37a
26	5	19.30b	4.35b	16.52b	10.67b	21.10b	1.47b	0.87ab	2.20b
26	25	67.25a	10.92a	25.67a	33.30a	51.15a	2.37a	1.42a	3.22a
DMSH		22.26	5.73	4.72	6.12	7.65	0.42	0.60	0.66

^zValores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

ALP: altura de planta; LOR: longitud de raíz; GRT: grosor de tallo; GDIE: grados día a inicio de estoloneo; GDIT: grados día a inicio de tuberización; GDMF: grados día a madurez fisiológica del tubérculo; NEP: número de estolones por planta; NTP: número de tubérculos por planta; PTP: peso de tubérculos por planta; PPT: peso promedio de tubérculos por planta; PFA: peso fresco de la parte aérea; PFR: peso fresco de la parte radicular; PFT: peso fresco total; PSA: peso seco de la parte aérea; PSR: peso seco de la parte radicular; PST: peso seco total.

6.4.4 Interacción variedad*densidad de plantación*tamaño de semilla

El efecto conjunto de variedad, densidad de plantación y tamaño de semilla tubérculo, indicó que Fianna con 26 plantas·m⁻² y tamaño de semilla de 25 g tuvo significativamente mayor número de GDMF, ya que requirió 23 y 74 grados día con respecto al tratamiento más próximo y alejado de éste (Cuadro 9). Comportamiento que pudo ser debido al genotipo (Andrade-Piedra *et al.*, 2015; Rykaczewska, 2015) y al tiempo de ocurrencia de las etapas fenológicas (Morales *et al.*, 2018), lo que puede reflejarse en la duración del ciclo del cultivo; aunque también es conocido que en condiciones de aeroponía, el ciclo de cultivo tiende a ser más largo (Ritter *et al.*, 2001). Situación similar se observó con la ALP, LOR y GRT, ya que en promedio tuvo 27, 34 y 30 % más que los demás tratamientos.

Cuadro 9. Comportamiento de la fenología y caracteres agronómicos del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

VARIEDAD	DENSIDAD DE PLANTACIÓN (PLANTAS·m ⁻²)	TAMAÑO DE TUBÉRCULO (g)	GDIE	GDIT	GDMF	ALP (cm)	LOR (cm)	GRT (mm)
FIANNA	16	5	108.66cd ^z	133.00b	561.66c	24.90bc	35.20abc	5.50b
FIANNA	16	25	104.33d	131.33b	612.66b	29.60ab	40.83ab	6.20ab
FIANNA	26	5	112.00bcd	135.00b	569.00c	21.16c	30.66bc	5.93b
FIANNA	26	25	108.66cd	133.00b	635.33a	35.86a	44.96a	7.86a
ÁGATA	16	5	129.33abc	161.33a	566.66c	24.90bc	23.53c	4.60b
ÁGATA	16	25	131.33ab	164.00a	570.00c	29.16abc	23.50c	5.33b
ÁGATA	26	5	135.00a	159.00a	565.00c	22.93bc	28.93bc	5.03b
ÁGATA	26	25	129.33abc	161.33a	566.66c	29.56ab	25.70c	6.13ab
DMSH			21.80	13.10	21.66	8.34	13.42	1.82

^zValores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

GDIE: grados día a inicio de estoloneo; GDIT: grados día a inicio de tuberización; GDMF: grados día a madurez fisiológica del tubérculo; ALP: altura de planta; LOR: longitud de raíz; GRT: grosor de tallo.

La variedad Fianna con densidad de 26 plantas·m⁻² y tamaño de semilla de 25 g tuvo en general los mayores atributos de biomasa fresca ($P \leq 0.05$), ya que en promedio presentó 64, 83 y 81 % mayor contenido de PFA, PFR y PFT, respectivamente, que los demás tratamientos (Cuadro 10). Un comportamiento similar ocurrió con el PSA, PSR y PST, ya que al igual que Fianna con densidad de 16 plantas·m⁻² y tamaño de semilla de 25 g, registraron los mayores valores con respecto a los otros tratamientos. Estos resultados indican la importancia de la biomasa en la producción de papa en condiciones de aeroponía, ya que según Kahn *et al.* (1983) indican que el número de tubérculos están correlacionados positivamente con el área foliar y número de hojas jóvenes por planta.

Cuadro 10. Comportamiento de la biomasa del cultivo de papa por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

VARIEDAD	DENSIDAD DE PLANTACIÓN (PLANTAS·m ⁻²)	TAMAÑO DE TUBÉRCULO (g)	PFA (g)	PFR (g)	PFT (g)	PSA (g)	PSR (g)	PST (g)
FIANNA	16	5	11.55c ^z	6.15b	13.85b	0.75c	0.80ab	1.55c
FIANNA	16	25	11.20c	12.80b	20.00b	2.96a	1.80a	4.70a
FIANNA	26	5	21.85b	12.10b	25.85b	1.75b	1.20ab	2.65bc
FIANNA	26	25	38.20a	57.00a	79.30a	3.15a	1.80a	3.75ab
ÁGATA	16	5	11.20c	7.25b	15.40a	1.05bc	0.50b	1.60c
ÁGATA	16	25	15.90bc	7.05b	19.10b	1.30bc	0.70b	2.05c
ÁGATA	26	5	11.20c	9.25b	16.35b	1.20bc	0.65b	1.75c
ÁGATA	26	25	13.15c	9.60b	23.00b	1.60b	1.05ab	2.70bc
DMSH			8.25	10.70	13.38	0.74	1.05	1.15

^zValores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

PFA: peso fresco de la parte aérea; PFR: peso fresco de la parte radicular; PFT: peso fresco total; PSA: peso seco de la parte aérea; PSR: peso seco de la parte radicular; PST: peso seco total.

La variedad Fianna con densidad de 26 plantas·m⁻² y tamaño de semilla de 25 g mostró el mayor PTP, ya que en promedio tuvo 73 % mayor rendimiento que los demás tratamientos (Cuadro 11), debido a un mayor NTP (33 %) con respecto a Fianna con densidad de 16 plantas·m⁻² y tamaño de semilla de 25 g, que fue el tratamiento que menos tubérculos presentó. Estos resultados indican la importancia que tiene el número de tubérculos por planta como componente en la producción de papa, ya que junto con el peso promedio de tubérculos por planta son dos de los caracteres que se relacionan directamente con el rendimiento (Zvomuya y Rosen, 2002).

En general, en la presente investigación se tuvo un diferencial en la producción de papa, ya que Fianna fue la que expresó el mayor PTP, sin embargo, estuvo por debajo de lo reportado para el número de tubérculos por planta en condiciones de aeroponía (Farran y Mingo-Castel, 2006; Muthoni *et al.*, 2011), lo que pudo ser debido a las condiciones de

temperatura durante el desarrollo del trabajo ya que según Andrade-Piedra *et al.* (2015), las condiciones óptimas de temperatura en el sistema deben fluctuar entre los 15 a 20 °C, y que no se pudieron mantener durante todo el ciclo biológico del cultivo, además de que la composición de la solución nutritiva fue poco eficiente en comparación con lo reportado por Tessema *et al.* (2017), y que se pudo observar en la producción de biomasa.

Cuadro 11. Comportamiento del rendimiento de papa y sus componentes por efecto de la interacción variedad por densidad de plantación por tamaño de semilla tubérculo. Teziutlán, Puebla. Primavera 2020.

VARIEDAD	DENSIDAD DE PLANTACIÓN (PLANTAS·m ⁻²)	TAMAÑO DE TUBÉRCULO (g)	NEP	NTP	PTP (g)	PPT (g)
FIANNA	16	5	6.50b ^z	5.00ab	10.80b	6.00a
FIANNA	16	25	6.00b	3.00b	27.90b	5.10a
FIANNA	26	5	7.50b	3.66b	16.20b	5.00a
FIANNA	26	25	9.50b	9.00a	95.00a	10.90a
ÁGATA	16	5	9.50b	6.00ab	28.85b	8.55a
ÁGATA	16	25	23.00a	9.00a	26.55b	5.45a
ÁGATA	26	5	8.00b	7.00ab	24.95b	3.70a
ÁGATA	26	25	16.00ab	6.50ab	39.50b	10.95a
DMSH			11.19	4.54	38.90	10.02

^zValores con la misma letra dentro de columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

NEP: número de estolones por planta; NTP: número de tubérculos por planta; PTP: peso de tubérculos por planta; PPT: peso promedio de tubérculos por planta.

VII. CONCLUSIÓN

La mayor duración en el ciclo biológico de la variedad Fianna, no repercutió en un mayor peso de tubérculos por planta, como sí ocurrió con el factor tamaño de semilla tubérculo.

La variedad Fianna con densidad de $26 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$ y tamaño de semilla de 25 g con el ciclo biológico más largo, fue quien tuvo el mayor peso de tubérculos por planta, siendo el número de tubérculos por planta, el componente que más contribuyó con el rendimiento.

VIII. LITERATURA CITADA

Allen, E. J.; O'Brien, P. J.; Firman, D. 1992. An evaluation of small seed for ware-potato production. J. Agric. Sci. 118: 185-193.

- Andrade-Piedra, J.L., Kromann, P. y Otazú, V. 2015. Manual para la Producción de Semilla de Papa usando Aeroponía: Diez años de Experiencias en Colombia, Ecuador y Perú. Centro Internacional de la Papa (CIP), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Quito, Ecuador. 267 p.
- Aragón P. de L., L.H. 1995. Factibilidades agrícolas y forestales en la República Mexicana. Ed. Trillas. México. 177 p.
- Arsenault, W. J.; Cristie, B. R. 2004. Effect of whole seed tuber size and pre-plant storage conditions on yield and tuber size distribution of Russet Burbank. *American Journal of Potato Research* 81: 371-376
- Barona D., Mateus-Rodríguez J. y Montesdeoca F. 2015. La planta de papa: ecofisiología y nutrición mineral. *In*: J.L. Andrade-Piedra, P. Kromann y V. Otazú (Eds.). Manual para la Producción de Semilla de Papa usando Aeroponía: Diez años de Experiencias en Colombia, Ecuador y Perú. Centro Internacional de la Papa (CIP), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Quito, Ecuador. 109 - 131 pp.
- Barrera, L. 1998. Fertilización del Cultivo de la papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. pp. 47-67. Fertilización de Cultivos de Clima frío. Monómeros Colombo Venezolanos. Segunda Edición. Colombia. 370 p.
- Benacchio, S.S. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nal. de Inv. Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.
- Beukema and van der Zaag, 1979. Potato improvement: some factors and facts. IAC, Wageningen.
- Beukema, H. P.; Turkensteen, L. J. y Peeten, J. M. G. Production, Seed, Varieties, Diseases, Storage, Markets. *Potato Explorer*, CD, 2000.
- Burton, W.G., 1989. The potato. Longman Group UK Limited, 742 pp.
- Cao W. and Tibbits T.W. 1994. Phasic temperature change patterns affect growth and tuberization in potatoes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119: 775-778.

- Cenzano, A., Abdala, G., & Hause, B. (2007). Cytochemical immuno-localization of allene oxide cyclase, a jasmonic acid biosynthetic enzyme, in developing potato stolons. *Journal of plant physiology*, 164(11), 1449- 1456. doi: 10.1016/j.jplph.2006.10.007
- Christiansen, J. 1967 *El Cultivo de la papa en Perú* Ed Jurica S.A. Lima, Perú, 351 p
- Dale, P., 1992. General presentation. In: Report on the seminar on scientific approaches for the assessment of research trials with genetically modified plants, 6-7 April 1992. OECD, Paris.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No. 33. FAO. Roma. 212 p.
- Dwelle, R. B. 2003. Potato Growth and Development, pp. 9-19. in: *Potato Production Systems*
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2008. Tubérculos semilla libres de enfermedades. Disponible en: <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/semillas.html> (Revisado el 23/09/2020)
- FAO. 2008. La papa: el cultivo. Disponible en: <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/cultivo.html> (Revisado el 24/09/2020)
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations- Food and Agriculture data). 2018. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (Revisado el 22/09/2020)
- Farran I. y Mingo-Castel A. M. 2006. Potato: Minituber Production Using Aeroponics: Effect of Plant Density and Harvesting Intervals. *American Journal of Potato* 83: 47-53.
- Frére, M., J.Q. Rijks y J. Rea. 1978. Estudio agroclimatológico de la zona andina. Nota Técnica No. 161. OMM No. 506. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.
- García C. L. F. 2008. Tesis. Selección de clones de papa (*Solanum tuberosum*). Por sus características agronómicas
- Gawronska, H., M.K. Thornton and R.B. Dwelle. 1988. Dry matter distribution and 4C partitioning in potatoes as influenced by heat stress. *Am. Potato J.*, 65(8):479-480.

- Hanneman, Jr., R.E., 1994. The testing and release of transgenic potatoes in the North American Center of diversity. In: Biosafety of Sustainable Agriculture: Sharing Biotechnology Regulatory Experiences of the Western Hemisphere (Eds. Krattiger, A.F. and Rosemarin, A.). ISAAA, Ithaca and SEI, Stockholm, 47-67.
- Hawkes, J. G. 1994. Origins of Cultivated Potatoes and Species Relationships, pp. 3-42. In: Potato Genetics. BRADSHAW J. E.; G. R (Eds.). CAB International, Wallingford
- Hawkes, J.G., 1990. The potato: Evolution, biodiversity and genetic resources. Belhaven Press, London, 259 pp.
- INIA (Instituto del Desarrollo Agropecuario). 2017. Manual del cultivo de la papa en Chile.
- International Fertilizer Industry Association (IFA). 1992. World Fertilizer Use Manual. International Fertilizer Industry Association. Paris, France. Pp. 37-550.
- Iritani, W. M.; Weller, L. D.; Knowles, N. R. 1983. Relationships between stem number, tuber set and yield of Russet Burbank potatoes. American Potato Journal 60: 423-431.
- Kleinkopf G. E. 1983. Potato, pp. 287-305. In: Crop Water Relations. Teare I., D.; Peet, M. M (eds.). John Wiley and Sons. New York, USA.
- Kolbe, H.; STEPHAN-BECKMANN, S. 1997. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). I. Leaf and stem. Potato Research 40: 111-129.
- Luján L. C. 1996. La historia de la papa. Boletín de la Papa, Volumen 1, Número 2
- Lynch, D. R., Kozub, G. C., & Kawchuk, L. M. 2001. The relationship between yield, mainstem number, and tuber number in five maincrop and two earlymaturing cultivars. American journal of potato research, 78(2), 83-90. doi: 10.1007/BF02874763
- Lynch, D. R.; TAI, G. C. C. 1985. Yield and yield component response of eight potato genotypes to water stress. Crop Sci. 29: 1207-1211.
- Mateus-Rodriguez, J. F., De Haan, S., & Rodríguez-Delfín, A. (2014). Genotype by environment effects on Potato mini-tuber seed production in an aeroponics system. Agronomy, 4(4), 514-528.

- Milton P., J.; Allen, S. D. 1995. Breeding Field Crops. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA. 494 p
- Montaldo, A. V. 1984. Cultivo y mejoramiento de la papa. Primera Edición. Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. pag. 39-40.
- Morales-Fernández, S. D., Mora-Aguilar, R., Rodríguez-Pérez, J. E., Salinas-Moreno, Y., Colinas-León, M., y Lozoya-Saldaña, H. 2011. Desarrollo y rendimiento de papa en respuesta a la siembra de semilla-tubérculo inmadura. Revista Chapingo Serie horticultura, 17(1): 67-75.
- Morales-Fernández, S. D., Mora-Aguilar, R., Salinas-Moreno, Y., Rodríguez-Pérez, J. E., Colinas-León, M. T., & Lozoya-Saldaña, H. 2018. Crecimiento y contenido de azúcares de tubérculo de papa en cuatro estados de madurez en condiciones de invernadero. Revista Chapingo. Serie horticultura, 24(1), 53-67.
- Muthoni J., Mbiyu M. Y Kabira J. N. 2011. Up-scaling production of certified potato seed tubers in Kenya: Potential of aeroponics technology. Journal of Horticulture and Forestry 8 (3): 238-243.
- OECD. 1997. Organisation for Economic Co-operation and Development. Consensus Document on the Biology of *Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum* (Potato). Disponible en: <https://www.oecd.org/env/ehs/biotrack/46815598.pdf> (Revisado el 21/09/2020).
- Otazú, V. 2010. Manual de producción de semilla de papa de calidad usando aeroponía. Centro internacional de la papa. 41p.
- Pérez, R. 2012. Aeroponía. Comisión de Estudios de Postgrado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Caracas, Venezuela. 37p.
- Porras, P. 2005. Problemática general del sistema productivo de papa con énfasis en fisiología y manejo de suelos. En: Memorias I Taller Nacional sobre Suelos, Fisiología y Nutrición Vegetal en el Cultivo de la Papa. Centro Virtual de Investigación de la Cadena Agroalimentaria de la Papa (CEVIPAPA). Bogotá, Colombia. 103 p.

- Quiñones Y., Izquierdo H., Martínez O., Alcántara P. y Rodríguez E. 2004. Métodos alternativos para la producción de semilla prebásica de papa (*Solanum tuberosum*, L.). Cultivos tropicales. 2(25): 23-27.
- Rendón A. Y. 2013. Sistemas aeropónicos en agricultura protegida. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/420/1/Yesica%20Rendon%20Aquino.pdf> (Revisado el 04/12/19).
- 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. 44:(2)127-135.
- Rodríguez E. L. 2009. Teorías sobre la clasificación taxonómica de las papas cultivadas (*Solanum* L. sect. *Petota* Dumort.). Una revisión. Agronomía Colombiana. 27 (3). 305-312.
- Román C. M. y Hurtado G. 2002. Guía técnica: cultivo de la papa.
- Rykaczewska, K. (2015). The Effect of High Temperature Occurring in Subsequent Stages of Plant Development on Potato Yield and Tuber Physiological Defects. American Journal of Potato Research, 92(3), 339-349.
- Salomón, J. L. Estudio y selección de progenies híbridas de semilla sexual de papa (*Solanum tuberosum*, L) en Cuba. [Tesis de Maestría]. 2001.
- Santibáñez, F. 1994. Crop requirements: Temperate crops. In: Handbook of agricultural meteorology. J. F. Griffiths Editor. Oxford Univ. Press. New York., USA. pp. 174-188.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2019. La papa, el cuarto cultivo de mayor producción en el mundo. Disponible en <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-papa-el-cuarto-cultivo-de-mayor-produccion-en-el-mundo?idiom=es> (Revisado el 21/09/2020)
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2019. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Revisado el 22/09/2020)
- Spooner, D.M. y W.L.A. Hettterscheid. 2005. Origins, evolution, and group classification of cultivated potatoes. pp. 285-307. En: Motley, T.J., N. Zerega y H. Cross (eds.).

Darwin's harvest: new approaches to the origins, evolution, y conservation of crops. Columbia University Press, NY.

Stark, J. C.; LOVE, S. L. (Eds.). Idaho Center of Potato Research and Education

Sturik, P. C. y Wiersema, S. G. Seed Potato Technology. Wageningen : Wageningen Pears. 1999. 387 p.

UCANR. University of California. 2016 Revisado el 24/09/2020).
<http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddconcepts.html>

Van Swaaij, A.C., Nijdam, H., Jacobsen, E. and Feenstra, W.J., 1987. Increased frost tolerance and amino acid content in leaves, tubers and leaf callus of regenerated hydroxyproline resistant potato clones. *Euphytica* 36: 369-380.

Vayda, M.E., 1994. Environmental stress and its impact on potato yield. In: Potato genetics (Ed. Bradshaw, J.E and Mackay, G.R.), CAB International, Wallingford: 239-262.

Vázquez, R. J. A. 2012. Diseño de un sistema de riego aeropónico automatizado. Tesis programa de maestría y doctorado en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. 72p.

Weathers, P. J., González, J., Kim, Y.J., Souret, F.F., Towier, M. J. 2004. Alteration of biomass and artemisinin production in *Artemisia annua* hairy roots by media sterilization method and sugars. *Plant Cell Reports*. 23:414-418.

White, P. J.; Whcatley, R. E; Hammond, J. P and Zhang, K. 2007. Minerals, Soils and roots. In: Vreugdenhil, D. (ed.). Potato biology and biotechnology, advances and perspectives. Elsevier Amtersdan. 739-752 p.

Wiersema S. G. 1985. Desarrollo Fisiológico de Tubérculos-Semilla de Papa. Centro Internacional de la Papa. Lima, Perú. 16 p.

Zvomuya J. and Rosen C. J. 2002. Biomass partitioning and nitrogen use efficiency of 'Superior' potato following genetic transformation for resistance to Colorado potato beetle. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 127: 703-709.

Zvomuya, J.; Rosen, C. J. 2002. Biomass partitioning and nitrogen use efficiency of 'Superior' potato following genetic transformation for resistance to Colorado potato beetle. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 127: 703-709.