



Manual de producción de semilla de papa de calidad usando **aeroponía**



RED LATINPAPA
Red Iberoamericana de Innovación en Mejoramiento y Diversificación de la Papa



VÍCTOR OTAZÚ

C E N T R O I N T E R N A C I O N A L D E L A P A P A

2010



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



Manual de producción de semilla de papa de calidad usando **aeroponía***

VÍCTOR OTAZÚ

2010

CENTRO INTERNACIONAL DE LA PAPA

*Traducción del inglés de: "Manual on quality seed potato production using aeroponics". V.Otazu. (CIP. 2010).

Manual de producción de semilla de papa de calidad usando aeroponía

© Centro Internacional de la Papa (CIP), 2010

ISBN 978-92-9060-398-6

Hecho el Ddepósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2010-15688

La edición de este Manual ha sido posible gracias al aporte de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). La traducción y publicación en español fue realizada por el autor y coordinada por la Red Iberoamericana de Innovación en Mejoramiento y Diseminación de la Papa - Red LatinPapa, con los aportes financieros de INIA España y Fontagro.

Las opiniones del autor en esta publicación no reflejan necesariamente los puntos de vista de USAID ni de la Red LatinPapa.

Las publicaciones del CIP aportan información importante sobre el desarrollo a la opinión pública. Se invita a los lectores a citar o reproducir este material en sus publicaciones. Como autor, el CIP solicita el reconocimiento de sus derechos y una copia de la publicación donde aparece la cita o el material reproducido. Por favor, envíe una copia al Departamento de Comunicación y Difusión a la dirección indicada abajo.

Centro Internacional de la Papa
P.O. Box 1558, Lima 12, Perú
cip@cgiar.org • www.cipotato.org

Citación Correcta:

Otaquí, V. 2010. Manual de producción de semilla de papa de calidad usando aeroponía.
Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú. 44 p.

Producido por el Departamento de Comunicación y Difusión del CIP (CPAD)

Coordinadora de producción

Cecilia Lafosse

Diseño y Diagramación

Jose E. Torres

Impreso por Tarea Asociación Gráfica Educativa

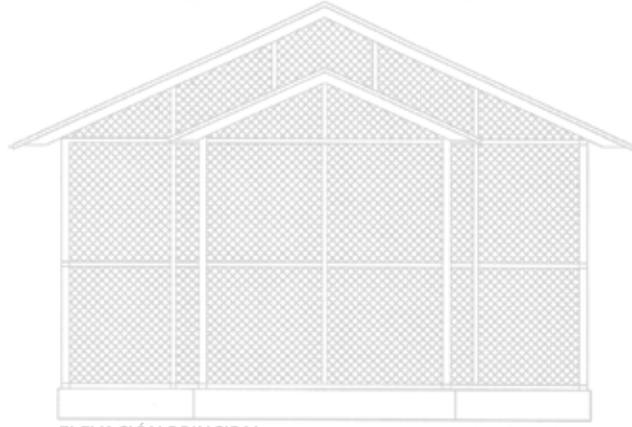
Tiraje: 1000 ejemplares

Noviembre 2010

Tabla de Contenido

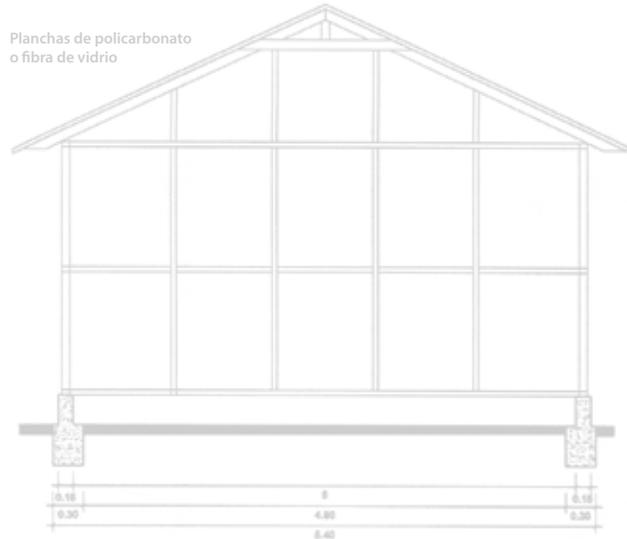
Introducción.....	5
Qué se sabe y qué falta conocer de la aeroponía	7
Factores a tenerse en cuenta antes de usar aeroponía	8
El invernadero	8
Elementos básicos.....	9
Materiales y construcción.....	9
Manejo de invernaderos y prácticas de asepsia	14
Reglas de asepsia	14
La fuente de agua.....	16
Las plantas.....	17
Manejo de plántulas <i>in Vitro</i>	17
Manejo de brotes de tubérculos.....	18
Manejo de esquejes.....	18
Diseño y materiales usados en aeroponía	19
Distribución y diseño de los cajones.....	19
Materiales.....	21
Construcción de los cajones.....	23
Instalación eléctrica y gasfitería	26
Medidor automático de tiempo y otros componentes.....	27
Solución nutritiva	28
Fuentes de nutrientes.....	28
Cómo calcular la concentración de nutrientes	30
Preparación de nutrientes.....	31
Métodos alternativos de preparación.....	31
Manejo de plantas y nutrientes	33
Cosecha y almacenamiento	35
Referencias	37
Apéndice	39
Términos técnicos usados en aeroponía	39
Carta de principales problemas y soluciones que pueden ocurrir en aeroponía.....	41





ELEVACIÓN PRINCIPAL

ESC:1/50



CORTE TRANSVERSAL

INTRODUCCIÓN

La mayoría de productores de papa de los países en desarrollo no usa semilla de calidad debido a sus altos costos y limitado acceso. Como resultado, existe la imperante necesidad de contar con métodos eficientes para producir semillas de calidad accesibles para los pequeños agricultores y a menores costos.

El motivo de este manual es facilitar la difusión de la aeroponía para la producción de semilla de papa de calidad en los países en desarrollo con el fin de mejorar el acceso y bajar los costos. La aeroponía es una técnica de producción de semilla pre básica de papa sin usar suelo (Figs. 1-3). Este método puede producir mayores rendimientos (hasta 10 veces más), de manera más rápida y a menor costo que los métodos convencionales de producción.

La producción convencional de semilla pre básica de papa se realiza multiplicando material limpio de cultivos *in vitro* en el invernadero. Con este método se produce entre 5 a 10 tuberculillos por planta. El método convencional usa sustrato esterilizado con mezclas de varios componentes. En la agricultura moderna, el bromuro de metilo ha sido usado como el desinfectante de suelo preferido, debido a su bajo costo y su habilidad de eliminar eficientemente artrópodos, nematodos, patógenos y semillas de malezas, sin alterar otras características del suelo. Sin embargo, hace algunos años se descubrió que este producto estaba en la lista de productos químicos que afectan significativamente a la capa de ozono de la atmósfera, por lo que actualmente está prohibido su uso en actividades agrícolas. En el Centro Internacional de la Papa (CIP), se evaluaron entonces otras alternativas: calor por vapor, solarización, otros productos como el 3-D ocon metam sodio, cloropicrina y otros. De estas alternativas, la esterilización con calor por vapor fue indicada como la más confiable, aunque con un costo significativamente mayor debido al equipo y combustible.

La aeroponía ofrece el potencial de mejorar la producción y reducir los costos en comparación con los métodos convencionales o con el otro método de cultivo sin suelo llamado hidroponía (cultivo en agua). La aeroponía explota eficientemente el espacio vertical del invernadero y el balance humedad-aire para optimizar el desarrollo de raíces, tubérculos y follaje.

En Corea y China ya se realiza producción comercial en masa de semilla de papa de calidad usando aeroponía. Esta tecnología viene usándose exitosamente en la zona centro-andina de Sudamérica desde 2006. En la estación experimental del CIP-Huancayo (Perú), se obtuvo una producción de más de 100 tuberculillos/planta usando materiales relativamente sencillos y baratos. Actualmente se está tratando de introducir esta tecnología en los sistemas de producción de semilla de papa de calidad en algunos países africanos ubicados al sur del Sahara.

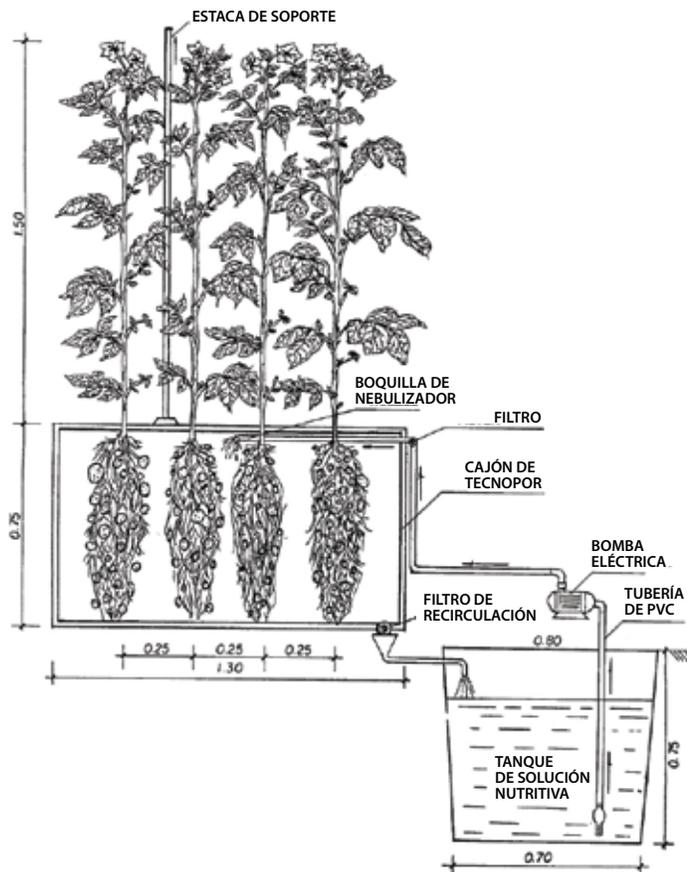


Figura 1 Representación gráfica de un sistema aeropónico para producción de semilla de papa.



Figura 2 Desarrollo de follaje de cvs de papa peruanos crecidos mediante aeroponía en la Estación CIP-Huancayo.



Figura 3 Desarrollo de tuberculillos del cv peruano Canchán INIA en condiciones aeropónicas en el CIP-Huancayo.

Qué conocemos y qué se necesita conocer en aeroponía:

La técnica de aeroponía fue usada inicialmente para la producción de hortalizas. Es una tecnología nueva, especialmente en la producción de semilla de papa. Las pruebas iniciales ofrecen la siguiente información:

- La producción de semilla de papa puede ser incrementada espectacularmente en el invernadero.
- Los diferentes cultivares (cvs) de papa responden de manera diferente con aeroponía. Los cvs tipo Tuberosum tienden a producir menos que los cultivares que tienen genes de Andigena. Esto también se observa cuando se desarrollan en sustrato.
- La producción con aeroponía es particularmente sensible al clima.
- Las cosechas son múltiples y secuenciales.
- El periodo vegetativo de las plantas se alarga entre 1 a 2 meses.
- La semilla proveniente de aeroponía produce igual que la semilla convencional.
- La inversión inicial puede recuperarse rápidamente.
- La inoculación con bacterias parece ser una técnica promisoriosa en el incremento de tuberculillos por planta. Esto se halla en plena investigación en el CIP.

- Con aeroponía se puede aumentar significativamente el ingreso o reducir los costos de producción de la semilla de calidad de papa, haciéndola más accesible a los productores.
- Las fuentes de energía no convencional (solar, eólica) parecen ser promisorias para aeroponía.

La optimización de producción de semilla de papa por aeroponía es posible. Los siguientes factores necesitan ser estudiados para este fin:

- Se necesita probar la respuesta de nuevos cvs. Condiciones artificiales como luz adicional pueden implementarse fácilmente en invernaderos para probar aquellos cultivares que usualmente crecen en otras latitudes.
- Diferentes cultivares pueden requerir diferentes concentraciones óptimas de solución nutritiva.
- Se necesita probar previamente los nutrientes disponibles en cada localidad. Las mezclas desconocidas o no probadas pueden causar fitotoxicidad.
- Se requiere determinar el distanciamiento óptimo entre plantas. Los cultivares de Andígena probablemente requieran de mayor espaciamiento que los cultivares tipo Tuberosum.
- Las plántulas *in vitro* rinden bien en aeroponía. Otro tipo de material vegetativo, como esquejes y brotes de tubérculos, necesitan ser probados y comparados.
- Se necesita determinar la mejor época de producción para cada lugar, de acuerdo al clima prevalente y la programación del cultivo en el campo.
- Los métodos convencionales de control de plagas y enfermedades no siempre son aplicables en aeroponía. Se requiere desarrollar nuevos métodos para este fin.
- El uso de energía no convencional (solar, eólica) parece ser promisorio en aeroponía.

Es necesario también conocer las limitaciones y desventajas que presenta esta tecnología:

- Depende mucho de la disponibilidad de energía eléctrica. Cortes de energía por periodos prolongados pueden conllevar a la pérdida total del ciclo de producción.
- Se requiere personal con entrenamiento especializado.
- Como cualquier tecnología nueva, presenta varias incógnitas que deben ser resueltas con la investigación.
- Algunos materiales/equipos no se encuentran disponibles en algunos países.
- Cualquier patógeno radicular se diseminará rápidamente al resto de los cajones.
- La aeroponía no funciona bien en ambientes calientes, a no ser que se acondicionen costosos equipos de refrigeración, lo que aumentaría los costos de producción.

FACTORES A CONSIDERAR ANTES DE EMPEZAR CON LA AEROPONÍA

El invernadero

Una estructura normal de invernadero, con una inversión mínima para el control climático interno, debe ser suficiente para proporcionar un ambiente seguro para la producción de papa. Esto nos permitirá mantener nuestros costos de producción tan bajos como sea posible. Este ambiente debe proteger a nuestras plantas de

pestes y condiciones climáticas adversas.

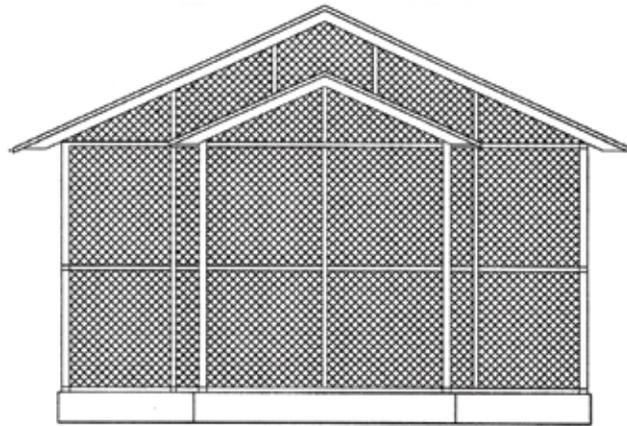
Elementos básicos

La infraestructura convencional de invernaderos para producción de semilla de papa es usualmente muy baja. En aeroponía necesitamos explotar el espacio vertical del invernadero. Tanto el follaje como el sistema radicular desarrollan mucho más en aeroponía que con el sustrato convencional. Usualmente, un factor climático limitante dentro del invernadero es el calor. Así, invernaderos con techos bajos son más calientes que invernaderos con techos altos. La orientación del invernadero es también importante para evitar el calor durante el día. Normalmente, los invernaderos con orientación este-oeste son más frescos que los que tienen orientación norte-sur. Los invernaderos sin techo (solo con malla) han probado ser inadecuados para aeroponía. Hay que tomar precauciones si sólo existe una malla antiáfida como techo, porque en ella se puede acumular polvo con esporas de patógenos que con la lluvia se pueden lavar e ir hacia los cajones, contaminando eventualmente a las plantas. El terreno asignado para la construcción del invernadero debe estar adecuadamente nivelado y no debe estar rodeado de árboles ni otros cultivos, especialmente solanáceos. El ambiente debe estar provisto de servicios de agua y electricidad.

Materiales y construcción

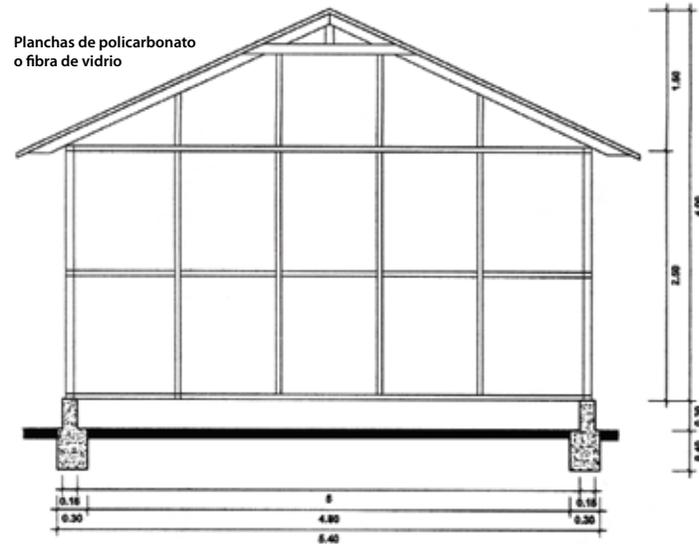
En casi todos los lugares se pueden encontrar materiales para la construcción de invernaderos. Los materiales más usados son madera, cemento, malla antiáfida y material para techo. Este último es el más crítico en términos de costo y duración. El plástico es más barato y puede durar hasta 3 años, dependiendo de su calidad. Para un invernadero de 15 x 5 m, el techo de plástico puede costar entre \$ 100 a \$ 200. El techo de policarbonato o fibra de vidrio dura más (10 a 15 años), pero su costo es significativamente mayor. El mismo invernadero necesitaría una inversión de \$ 1,500 a \$ 2,000 con el techo de este material. Si se escoge la opción del plástico, la infraestructura de madera donde va anclado el techo no debe tener superficies filudas que se puedan romper con vientos fuertes. La malla antiáfida usualmente dura alrededor de 10 años. El piso necesita una capa de 3 pulgadas de grosor de piedra chancada o grava. Esta capa servirá para aislar del suelo posibles pestes como malezas y patógenos. Los pisos de cemento son costosos y durante los días soleados absorberán e irradiarán mucho calor. En los planes de construcción debe considerarse la inclusión de una antecámara.

El techo necesita ser recubierto por una malla sombreadora para bajar el calor solar dentro el invernadero. En el mercado hay varios tipos de mallas sombreadoras con diferentes porcentajes de transmisión luminosa. Tanto las puertas como el techo requieren estar herméticamente sellados para evitar la entrada de insectos. Para fijar el techo y las mallas resulta muy útil contar con una pistola engrapadora de madera. La altura del invernadero debe ser de 2.5 m o mayor. Para lugares calientes, es mejor una altura de 3 m. Los diagramas y figuras que se muestran a continuación son útiles para construir un invernadero con fines de producción de semilla de papa (Figuras 4-9).



ELEVACIÓN PRINCIPAL

ESC:1/50



Planchas de policarbonato
o fibra de vidrio

CORTE TRANSVERSAL

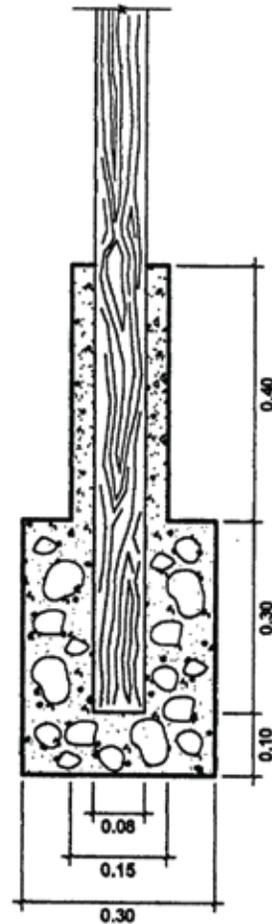
Figura 4 Vista frontal y corte transversal de un invernadero regular con malla lateral y techo de fibra de vidrio o policarbonato.

Figura 5 Detalle del anclaje de una columna típica de madera de 4"x4". Nótese el detalle del cimiento, que queda al nivel del piso, y del sobre cimiento, por encima del mismo.

COLUMNA TÍPICA DE MADERA
CADA 3 mts. (4"x4")

SOBRECIMIENTO
Concreto 1:8 + 15% P.M.

CIMIENTO
Concreto + piedra 1:10 + 25% P.M.



DETALLE DE CIMIENTO Y SOBRECIMIENTO
ESCALA 1/10

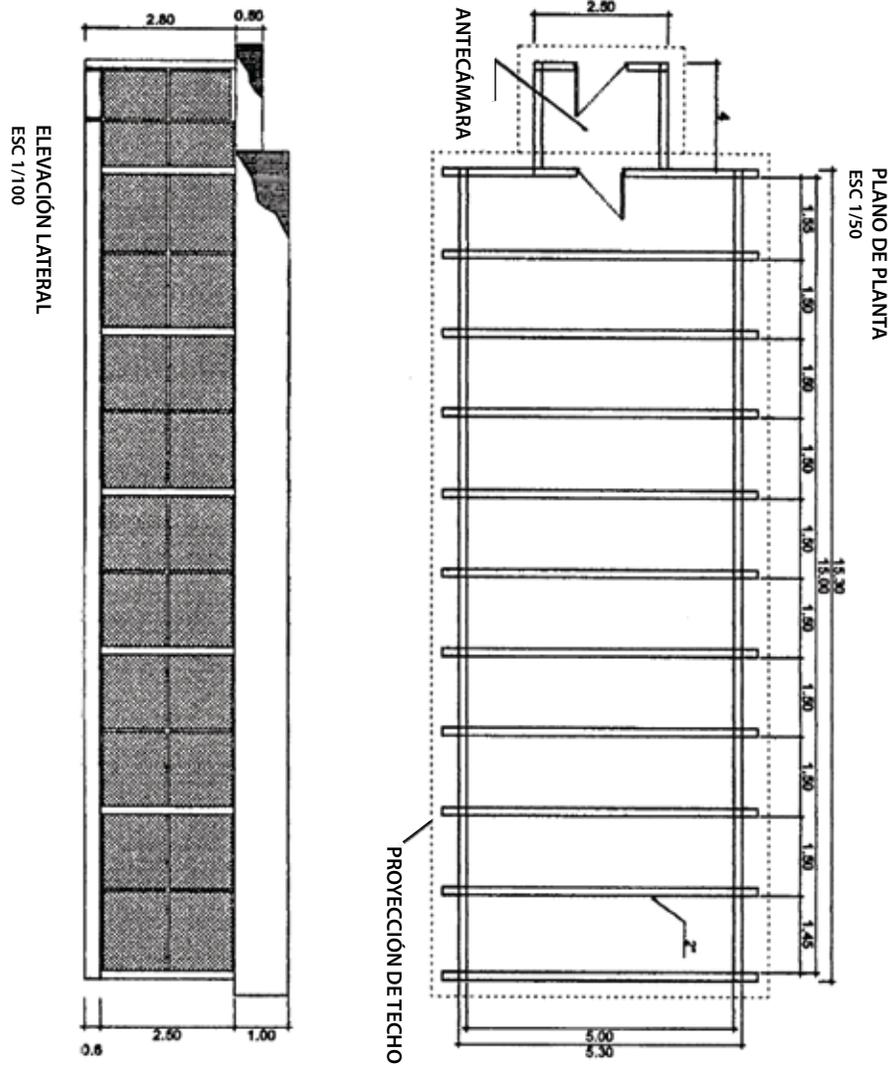


Figura 6 Elevación lateral y plano frontal de un invernadero de 15 x 5 m. incluyendo su antecámara.



Figura 7 Distribución de las columnas de madera ancladas en el cemento en un invernadero de 15 x 5 m.



Figura 8 El mismo invernadero con sobre cemento y techo de policarbonato.



Figura 9 Invernadero terminado, con techo de plástico y antecámara.



Manejo del invernadero y prácticas de asepsia

La producción convencional de semilla de papa en invernaderos requiere de estrictas medidas de sanidad para evitar contaminaciones. En aeroponía, estas medidas deben ser de estándares más estrictos aún. Asumiendo que todo el invernadero está adecuadamente sellado, ningún tipo de insecto debe pasar al interior. El encargado del invernadero debe ser entrenado adecuadamente al respecto. La antecámara es un componente importante del invernadero pues se deben evitar entradas y salidas innecesarias. Los visitantes, en lo posible, deben permanecer afuera. El operador no debe haber visitado un campo de cultivo antes de ingresar al invernadero. Al entrar a un invernadero solo se debe abrir la puerta de la antecámara. Nunca abrir ambas puertas al mismo tiempo. La antecámara debe tener un lavatorio con agua y los siguientes materiales: 2 a 3 mandiles limpios, jabón sólido o líquido, una botella plástica conteniendo hipoclorito de Na (sodio) o Ca (calcio) al 2 % y papel toalla. Además, en la entrada se debe poner una bandeja con cal viva en polvo o polvo de azufre. Un trapo empapado en una solución de sulfato de cobre o amonio cuaternario (cloruro de benzalkonio y otros sinónimos) cumple similar función. Pasando los zapatos por esta bandeja se evita el ingreso de ácaros y esporas de patógenos del suelo al interior del invernadero. Si no se van a tocar las plantas, se deben lavar las manos con jabón y agua. Si se van a manipular plantas, además del jabón también debe usarse el desinfectante. Si se van a manipular plantas por un periodo prolongado, es mejor usar guantes descartables. El desinfectante debe ser usado después de manipular una planta y antes de empezar con la siguiente. El operador debe usar siempre el mandil, que debe estar colgado en la antecámara y nunca debe sacarse fuera del invernadero. De esta manera se disminuye las posibilidades de entrada de insectos que se puedan impregnar en nuestra ropa. El siguiente letrero debe colgarse a la entrada del invernadero:

REGLAS DE ASEPSIA

Nunca abrir ambas puertas al mismo tiempo.

Pise en la bandeja desinfectante antes de entrar.

Si no va a tocar las plantas lávese las manos con jabón.

Si va a tocar las plantas use el desinfectante antes.

Use siempre un mandil en el interior.

No se permite bebidas ni comidas.

El hipoclorito de sodio se vende usualmente como blanqueador en las tiendas, en concentraciones que varían de 3 a 5%. Una solución de 0.1% es suficiente para desinfección superficial de la semilla y eliminar la mayoría de bacterias. El hipoclorito de calcio se vende como polvo blanco que puede ser disuelto en agua. Ambos productos son usados para el tratamiento del agua potable. Ambos son descompuestos por acción de la luz solar, de modo que si se usan en botellas de plástico, estas deben ser recubiertas con papel aluminio para evitar el ingreso de luz. Para eliminar virus se necesita una solución del 2% de hipoclorito de calcio. Si vamos a cortar esquejes, necesitamos flamear los cuchillos o sumergirlos en una solución de hipoclorito con jabón. El alcohol absoluto diluido al 70% es también eficiente para la desinfección de las manos.

La colocación de trampas amarillas en 2 o 3 puntos del invernadero ayuda a controlar insectos y además es útil para detectar su presencia. Si las trampas tienen insectos muy a menudo, significa que debe haber entradas mal selladas en algún punto del invernadero, o que el operador está siendo descuidado. La malla antiáfida es a prueba de insectos, pero no a prueba de esporas de patógenos. Esporas de *Phytophthora*, *Oidium* y otros patógenos pueden atravesar la malla y pasar al interior del invernadero y si encuentran condiciones climáticas favorables desarrollarán la enfermedad. En este caso se deben usar fungicidas probados. En las plantas aeropónicas se recomienda usar el 50% de la dosis recomendada. Se recomienda también usar normas de uso seguro de plaguicidas. Cuando se emplea pesticidas, siempre se debe usar equipo de protección. Se debe contar con una escalera portátil para manejar las plantas aeropónicas. Nunca se debe mezclar pesticidas con la solución nutritiva a no ser que se hayan hecho pruebas preliminares.

Se debe contar con un termómetro dentro del invernadero. El operador debe registrar diariamente las temperaturas máximas, normales y mínimas. Las temperaturas nocturnas mínimas por debajo de 4°C son muy bajas para aeroponía. Así mismo, las temperaturas máximas (diurnas) por encima de 30°C son muy calientes. Cuando empieza la tuberización es deseable que las temperaturas máximas nocturnas estén en el rango de 10-15°C y las temperaturas diurnas, alrededor de 20°C. Las mallas sombreadoras ayudan mucho a reducir las temperaturas diurnas (Figuras 10, 11). Hay varios tipos de mallas sombreadoras en el mercado (Figura 12). Normalmente se usa la malla sombreadora negra, que reduce la entrada de luz en 50 por ciento y es de bajo costo y buena disponibilidad. Es también importante monitorear la temperatura de la solución nutritiva. Cuando las temperaturas se elevan demasiado (más de 20°C), ayuda colocar bolsas de plástico con hielo en el interior del tanque que contiene la solución nutritiva. También se pueden usar radiadores de enfriamiento, pero esto eleva los costos de producción.

Figura 10 Malla sombreadora (50%) cubriendo el techo de plástico. Además de dar sombra, la malla también protege al techo de los vientos fuertes..



Figura 11 Invernadero con diferente tipo de instalación de malla sombreadora. Esta instalación permite sombrear solo cuando hay excesivo calor.

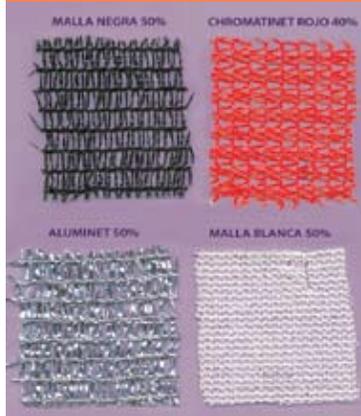


Figura 12 Diferentes tipos de mallas sombreadoras.

La fuente de agua

Este es otro factor importante a tener en cuenta. Usualmente el agua potable se trata con cloro. Tanto el cloro como el sodio son elementos que incrementan significativamente la conductividad eléctrica del agua. Cuando el agua potable se usa para regar plantas en sustratos normales, el cloro es mayormente inofensivo porque se combina con compuestos orgánicos para formar cloruros, los que no son nocivos para las plantas. En hidroponía y aeroponía el cloro está directamente disponible para las plantas y puede ser dañino si está presente en concentraciones mayores a 2 ppm. El síntoma común es el quemado de las puntas de las raicillas. El indicador que mide la cantidad de sales en el agua es la conductividad eléctrica (CE). A mayor contenido de sales, es mayor la CE y viceversa. La CE es expresada en miliSiemens por centímetro (mS/cm), deciSiemens por metro (dS/m) o milimhos por centímetro (mmhos/cm). El agua a ser usada en aeroponía debe tener una baja CE, que no exceda a 1 mS/cm. El pH del agua

es otro indicador útil. Fuentes de agua con un pH mayor a 8 son cuestionables para ser usadas en aeroponía. Es muy útil realizar un análisis del agua aunque las medidas de CE y pH caigan dentro de niveles aceptables.

Otro problema que podemos tener con la fuente de agua es la contaminación biológica. Generalmente las fuentes de agua de pozos profundos no están contaminadas. Las aguas de pozos superficiales, especialmente los ubicados cerca de centros urbanos, probablemente estén contaminadas con bacterias coliformes incluyendo la *Erwinia* (*Pectobacterium*). Las aguas cuya fuente es sospechosa deben pasar un análisis microbiológico. Hay filtros especiales para minimizar estos riesgos. Si es posible, el agua debe ser filtrada antes de ir al tanque de nutrientes. Hervir el agua es otra alternativa en ausencia de otras.

Las plantas

En aeroponía se deben usar plantas en óptimo estado. Por razones sanitarias se prefiere el uso de plántulas *in vitro*. Sin embargo, estas requieren ser manejadas por personal con experiencia. Estas plantas deben tener la edad y tamaño adecuados antes de pasar al periodo de aclimatación y antes de su ingreso al invernadero. A veces, por bajar costos, se producen plántulas muy apretadas con poco espaciamiento para su desarrollo en condiciones *in vitro*. Estas plántulas demorarán más tiempo en desarrollar un buen sistema radicular en arena. Las plántulas muy viejas y amarillentas no son adecuadas para aeroponía. Otros materiales, como brotes de tubérculos y esquejes, deben estar limpios y libres de enfermedades. La presencia de cualquier síntoma debe ser motivo suficiente para eliminar todo el lote de plantas. Esto puede ser visible especialmente al momento de transplantarlas de las bandejas de arena a los cajones. El tejido radicular y el tallo subterráneo deben estar completamente limpios y libres de arena. Antes de ponerlas en aeroponía, las plantas deben ser mantenidas en un invernadero limpio con fines de aclimatación.

Manejo de plántulas *in vitro*

Cuando nos llegan plántulas *in vitro* en tubos o magentas deben ser colocadas inmediatamente bajo luz. Para transporte se deben empaquetar de manera que no estén expuestas a la luz por varios días. El ambiente del laboratorio es diferente al ambiente del invernadero, por lo tanto las plantas deben ser climatizadas por 2-3 días antes de ponerlas en las bandejas de arena. También pueden ser transplantadas directamente a los cajones aeropónicos. Sin embargo, en nuestra experiencia notamos que un número considerable de plántulas muere al no tener suficiente tejido radicular que absorba el agua y los nutrientes. La otra ventaja de hacerlas enraizar previamente en arena es que para el trasplante se pueden seleccionar solo las plantas uniformemente desarrolladas, descartándose las más débiles. La arena debe provenir de una fuente no contaminada. Tener en cuenta que la arena proveniente de ríos está usualmente contaminada con residuos químicos. Las plantas provenientes de semilla sexual de papa son buenas indicadoras de contaminación. Previamente se deben hacer pruebas con arenas de diferentes fuentes para identificar la más confiable. La arena debe ser lavada varias veces con agua de caño antes de su esterilización. Si no se tiene equipo de esterilización, después de lavada la arena puede ser hervida con agua o lavada de nuevo

con agua hirviendo varias veces. La mayoría de patógenos son eliminados con calor después de ½ hora a 70°C. Sustratos esterilizados a temperaturas mayores pueden liberar manganeso, tóxico para las plantas. Con la arena no se presenta este problema. Luego de su esterilización, la arena se pone en bandejas en capas de 5 a 7 cm. Si no se tuvieran bandejas de plástico, se pueden usar jabas cubiertas con plástico. Estas jabas pueden utilizarse después para fines de almacenamiento. La arena debe tener suficiente humedad para hacer agujeros a intervalos regulares para el trasplante. Por lo menos un día antes del trasplante las plantas deben ser expuestas a la humedad relativa del invernadero. En esta etapa se debe evitar la exposición directa a la luz solar. Durante los primeros 3 días las plantas deben ser regadas con la solución nutritiva diluida 1:1 con agua. Después, se debe usar la solución nutritiva normal. Evitar regar mucho o poco. Dependiendo del clima interno del invernadero, se debe regar solo cuando sea necesario, pues no debemos exponer a las plantas a un estrés innecesario. Se debe evitar la exposición directa a la luz solar durante los primeros días después del trasplante. Después de 15 a 20 días las plantas deben haber formado suficiente sistema radicular como para ponerlas en los cajones aeropónicos.

Manejo de brotes de tubérculos

Se deben plantar tuberculillos pre básicos (que nunca fueron expuestos a condiciones de campo) con brotes vigorosos a intervalos regulares en bandejas de arena en forma similar a las plántulas *in vitro*. Se deben preferir los tuberculillos provenientes de cultivo aeropónico. Estas plantas deben regarse solo con agua, pues las plantas emergentes dependerán mayormente del tubérculo semilla para su alimentación. Dependiendo del cultivar y las condiciones climáticas, después de 2 a 3 semanas las plántulas deben haber formado tallos pequeños y suficiente sistema radicular para su trasplante en aeroponía. Usualmente se obtiene más de 1 tallo por semilla, dependiendo del grado de dominancia apical de la semilla. El tubérculo semilla restante se elimina. Si en la bandeja hubiera algún tubérculo semilla con síntomas de podredumbre blanda u otra enfermedad, se deben eliminar todas las plantas de la bandeja.

Manejo de esquejes

Si contamos con plantas madres limpias, después de 2 a 3 semanas de plantadas debemos proceder a cortar las puntas apicales de cada planta para inducir la formación de más ramas laterales. Antes de cada corte, esterilizar los cuchillos o bisturís que se van a usar. Se deben obtener esquejes de ramas jóvenes para colocarlas en bandejas con arena en forma similar a lo explicado anteriormente. Sumergir previamente la punta de los esquejes en una solución de hormona o polvo hormonal justo antes de ser colocados en arena facilitará el proceso de enraizamiento. No deben usarse esquejes muy viejos. El riego durante la primera semana se hará solo con agua, hasta que se forme algo de tejido radicular. Después, el riego debe hacerse del mismo modo que en el caso de las plántulas *in vitro*. Cuando los esquejes tengan suficiente sistema radicular, transplantarlas a los cajones aeropónicos. Los esquejes viejos solo formarán raíces y no deben ser usados para aeroponía. Mantener siempre condiciones asépticas para evitar contaminaciones.

DISEÑO Y MATERIALES USADOS EN AEROPONÍA

Distribución de cajones y diseño

Si ya se cuenta con un invernadero adecuado, se deben distribuir los cajones de modo que se haga un uso eficiente del espacio, pero también brindando comodidad al operador. Los cajones pueden ser distribuidos a lo largo del invernadero (Figura 13) o a lo ancho (Figura 14). En el primer patrón de distribución podemos poner 994 plantas en 80 m², con un uso de eficiencia de espacio de 63% o 12.4 plantas/m² de espacio de invernadero, asumiendo una densidad de 20 plantas/m². Con la segunda distribución, podemos poner 1480 plantas en 162 m² con un uso de eficiencia de espacio de 50.9%, o 9.1 plantas/m², usando la misma densidad anterior. Sin embargo, en el primer caso los cajones laterales tienen solo una ventana, lo que representará una incomodidad para el operador al momento de las cosechas. En el segundo caso, se tienen ventanas a cada lado, lo que facilita las operaciones de cosecha. La otra consideración a analizar antes de decidir sobre el diseño y distribución de cajones es la disponibilidad de materiales. El material más costoso en la construcción de cajones es el tecnopor. Este viene en planchas de diferentes tamaños, dependiendo del lugar, y en algunos países no es fácil encontrarlo. El ancho de los cajones deberá ser adecuado al tamaño de las planchas disponibles. Los tamaños usualmente disponibles son de 3.0 m x 1.5 m y 2.4 m x 1.2 m. El tamaño más grande es más conveniente porque se le puede usar en forma más eficiente en cuanto a la distribución de plantas por cajón. Las Figuras 15 y 16 muestran la distribución de plantas en dos cajones de anchos diferentes. También hay que considerar el tipo de nebulizadores (boquillas atomizadoras) a utilizarse. La mayoría de nebulizadores alcanza eficientemente un radio de 50 cm, por lo que conviene usar un cajón de 1 m de ancho con una manguera central de alimentación. Un cajón de 1.5 m de ancho requerirá de 2 mangueras de alimentación (Figura 16).

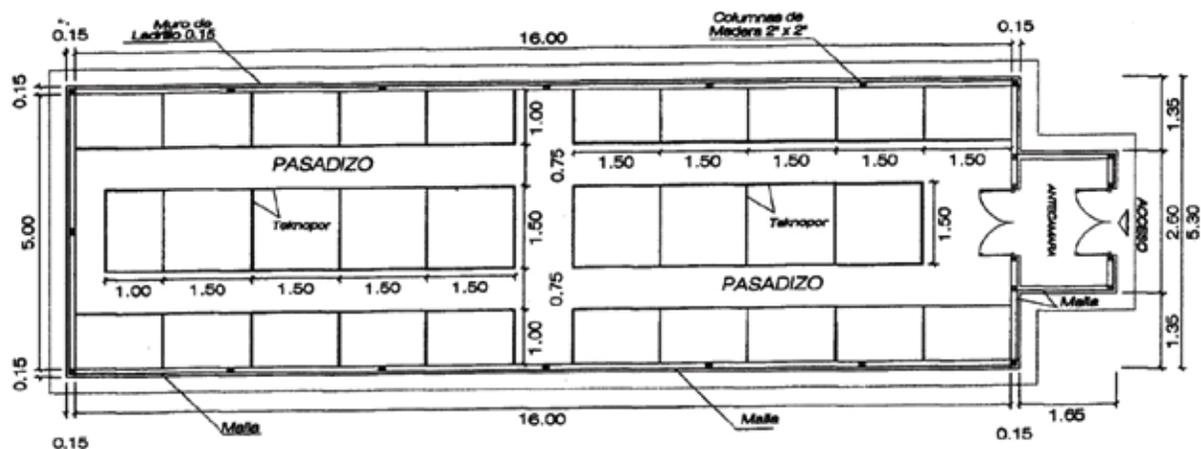


Figure 13
Distribución de
cajones de aeroponía
para un invernadero
de 16 x 5 m.

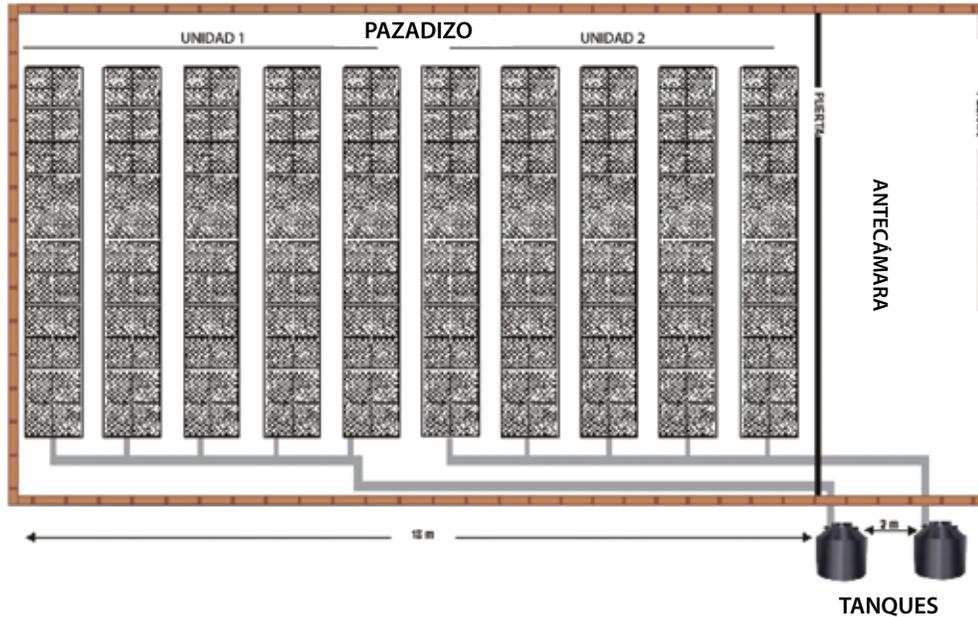


Figura 14 Una distribución diferente de cajones en un invernadero de 18 x 9m. GTIL, Nairobi.

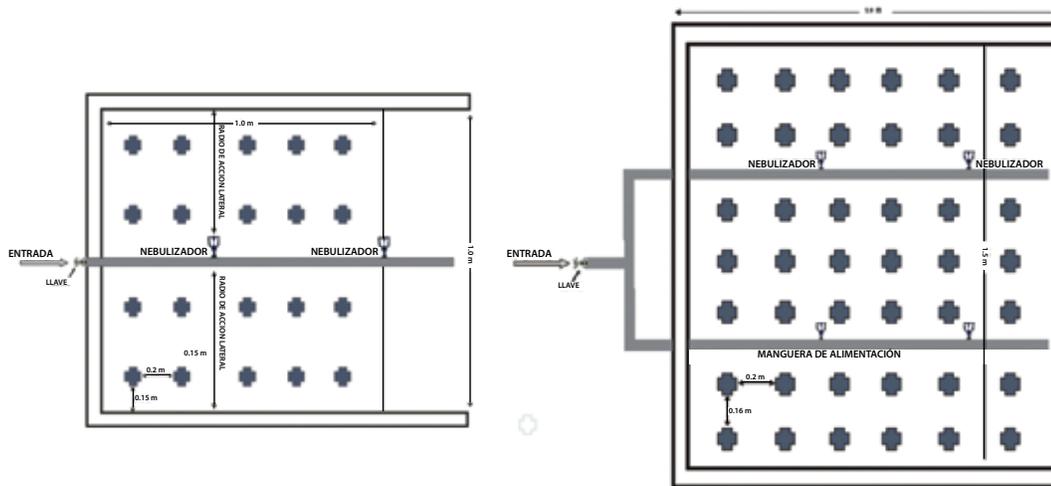


Figura 15 (Iz.) Un modelo de distribución de plantas en un cajón de 1 m (1.2 m.) de ancho. El tubo alimentador debe estar en el centro.

Figure 16 (Der.) Otro modelo de distribución de plantas en un cajón de 1.5 m. de ancho con 2 tubos alimentadores. Con este modelo se consigue mejor eficiencia en espacio, pero menos comodidad para el operador.

Materiales

Los cajones de aeroponía deben tener un aislamiento térmico adecuado, de modo que las fluctuaciones de temperatura dentro del invernadero no afecten el desarrollo radicular de las plantas. Los cajones también deben tener una rigidez y solidez adecuadas. Esto se debe tener en cuenta junto con la disponibilidad de materiales. Para la construcción de cajones tenemos varias opciones. El armazón de los cajones puede ser de metal o madera. La madera es de bajo costo y está siempre disponible. Para llenar el armazón debemos considerar un material aislante que también dé soporte mecánico a la estructura. El tecnopor es el mejor, pero también se puede considerar el cartón o la madera prensada (mapresa), siempre y cuando se le provea de protección contra la humedad. Todo este material de relleno de estructura debe ser revestido con plástico negro, que siempre está disponible. Un soldador de plástico (Figura 17) es una herramienta muy útil para hacer revestimientos plásticos. Con esta herramienta podemos eliminar arrugas innecesarias y parchar agujeros. El cuadro 1 muestra una lista de materiales usados en aeroponía, con una referencia de precios para el Perú.



Figura 17 Soldador de plástico, útil en el revestimiento interno con plástico.

Cuadro 1. Materiales y equipo para un módulo de aeroponía en un invernadero de 16 x 5 m.

Item	Unidad	Cantidad	Precio de referencia/ unidad en Peru. US \$
Tanque y materiales de gasfitería			
Tanque de plástico (500-600 lt)	ea	2	90
Niples galvanizados (o de PVC) 1"	ea	4	1
Unión tipo codo (pvc) 1"	ea	6	1
Unión tipo codo (pvc) ¾"	ea	10	1
Unión tipo codo (pvc) 2"	ea	4	1.5
Unión universal (pvc) 1"	ea	4	2
Unión tipo T pvc 1"	ea	2	1
Unión tipo T pvc ¾"	ea	6	1
Adaptador pvc, slipxmale thread	ea	16	1
Tubo pvc doble de 3m, 1"	ea	1	7
Tubo pvc doble de 3m, ¾"	ea	1	6
Unión de reducción, pvc, slip, 1"to ¾"	ea	4	1
Tubo de desagüe pvc, de 3m ,2"	ea	1	5
Llave de paso, pvc ¾x16mm	ea	8	1.55
Tubo negro de polietileno 16mm(5/8")	m	70	0.18

Cinta teflón	ea	8	1.5
Shut off valve, ball type (metal) 1"	ea	2	4.5
Shut off valve, ball type (metal) 1" (metal) 3/4"	ea	10	4.5
Válvula check 1"	ea	2	3
Spin clean filter 1"	ea	2	24.45
Nebulizadores Naandan	ea	93	2.44
Cajones			
Madera para la armazón y piso, 2"x2"x10'	ea	280	3.1
Madera para las tapas 2"x3/8"x10	ea	30	2.8
Planchas de tecnopor de 2" (grosor), 2.40x1.20m	ea	61	8.5
Plástico negro de 3m de ancho	m	100	1.5
Plástico transparente, de 3m de ancho	m	50	1.5
Cinta Vinil duct	ea	3	6.1
Cinta adhesiva gruesa	ea	5	2
Pegamento silicona	tubo	10	3.36
Clavos, 3"	kg	10	1.5
Clavos, 4"	kg	4	1.5
Equipo y material eléctrico			
Electro bomba de 0.5 HP (con hidroneumático)	ea	2	370
Generador eléctrico (para cortes de energía)	ea	1	500
Programador de tiempo (timer),	ea	2	50
Cable eléctrico, No 12	m	50	35
Llave electromagnética	ea	1	72
Interruptor eléctrico de cuchillo	ea	2	20
Medidor de pH	ea	1	180
Medidor de CE	ea		180
Nutrientes			
Nitrato de potasio	kg	2	1.2
Nitrato de amonio	kg	2	1.1
Superfosfato triple de Ca	kg	2	1.2
Sulfato de magnesio	kg	1	1.0
Micronutrientes(Fetrilon combi)	kg	1	10
Acido sulfúrico o fosfórico	lt	0.5	10

Construcción de los cajones

La altura de los cajones debe ser entre 80 cm a 1 m, dependiendo de las variedades a cultivar. Las cajas deben tener ventanas laterales de 0.5 m x 0.3 m cada metro, de modo que el operador pueda tener acceso al sistema de raíces al momento de la cosecha. Un carpintero puede construir estas estructuras (figuras 18, 19). Cuando el sistema está en funcionamiento, el líquido sobrante de la nebulización debe regresar por gravedad a la solución nutritiva. Con este fin, las cajas deben tener una pendiente. Una pendiente de 30 cm es adecuada para las cajas de 7 m de largo (4%). La cubierta superior de tecnopor debe tener agujeros para la fijación de las plántulas (figura 21). Esos agujeros necesitan estar forrados con plástico o con trozos de PVC (figuras 21, 22). Se obtiene un ajuste adecuado cuando hacemos agujeros de $\frac{1}{2}$ " y el forrado con piezas de PVC de $\frac{3}{4}$ ". Esto se debe hacer de acuerdo a las distancias requeridas. Para las cajas estrechas, han demostrado ser adecuadas cuatro filas de agujeros de 25 cm de distancia para la mayoría de los cultivares de papa (20 plantas/m²). Un tamaño conveniente para la cubierta superior es 1.20 m x 1.20 m. Así se usó en las instalaciones aeropónicas de Kabale (Uganda) y Ruhengeri (Rwanda).

El revestimiento interior de las cajas requiere plástico negro (Figura 20) pues de lo que se trata es de evitar cualquier entrada de luz al sistema radicular de las plantas. La parte inferior interna (piso) debe ser forrada con plástico grueso para evitar la fuga de nutrientes. El revestimiento superior externo se puede hacer con plástico transparente o blanco para permitir una menor concentración de calor y mayor luminosidad para las plantas. En el revestimiento interior de las cubiertas superiores también se debe usar plástico negro delgado (Figura 22).

El mismo plástico negro delgado debe usarse para cubrir las ventanas, a manera de doble cortina. La cortina interna previene que la solución nebulizada de nutrientes salga fuera de la caja. La externa prevé que la luz no entre a la caja. Cuando usamos plástico grueso para cubrir las ventanas, se puede dañar el sistema radicular o causar la caída de los tuberculillos cuando queremos abrir las ventanas para la cosecha o durante las inspecciones. La tubería de 16 mm debe correr a través de la parte central superior de las cajas estrechas con nebulizadores cada 60-65 cm. La cubierta superior debe fijarse exactamente sobre el resto de la estructura. Las barras transversales deben sostener la tubería de distribución (Figura 20). Estas barras estarán expuestas a la solución nutritiva. Por lo tanto, es bueno que sean de aluminio, porque este material no se corroe. Sin embargo, esto puede ser caro por lo que se puede reemplazar con madera o algún otro material más barato (como el fierro), con la protección adecuada contra la corrosión. Las cajas más amplias tienen dos tuberías centrales. Contar con dos tanques y dos bombas por módulo nos permite tener sistemas separados de alimentación para las plantas in Vitro y para otro tipo de material vegetal. Esto también facilita la planificación de experimentos con el módulo. Las bombas y los tanques deben ponerse en la parte externa lateral del invernadero. Cada bomba alimenta a una mitad de las cajas. Todas las cajas deben tener una pendiente hacia el tanque. Estas pendientes permiten que el exceso de la solución nutritiva regrese a los tanques por gravedad. Con este fin, los tanques deben instalarse por debajo del nivel del suelo de manera que la parte inferior de cada caja esté siempre por encima de la porción superior de los tanques. La siguiente figura ilustra el proceso de construcción de las cajas aeropónicas.



Figura 18 Un módulo de aeroponía en construcción en Njuli, Blantyre-Malawi. El armazón de los cajones es de madera. Las barras superiores son de aluminio, que es costoso. Estas pueden ser reemplazadas por madera u otro material recubierto por plástico.

Figura 19 Estructura de madera llenada con planchas de tecnopor.



Figura 20 Un cajón de aeroponía recubierto internamente con plástico grueso. Notar cómo va colocada la manguera central para los nebulizadores.

Figura 21 Parte de un cajón mostrando cómo debe ir la manguera central de alimentación por debajo de las tapas de tecnopor. Notar también la distribución de los agujeros para las plantas.



Figura 22 Recubrimiento externo e interno de las tapas del cajón. Notar también el recubrimiento de los agujeros con tubos pvc.

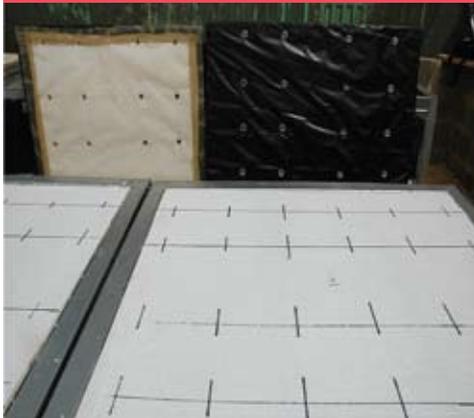


Figura 23 Cajones aeropónicos forrados con plástico en un módulo comercial en Hualahoyo, Huancayo-Perú.



Instalación eléctrica y de gasfitería

La conexión de electricidad debe ser independiente para el módulo. Una fuente alterna de electricidad debe estar disponible todo el tiempo para emergencias en casos de cortes de energía eléctrica. En lugares donde hay frecuentes cortes de energía, se debe considerar la compra de un buen generador eléctrico con un dispositivo de arranque automático. El módulo con plantas no debe estar sin energía eléctrica por más de una hora, especialmente en horas de calor. Los tubos, uniones y niples de pvc se pueden encontrar en cualquier ferretería. En esta etapa, el apoyo de un técnico electricista y de un gasfitero calificado es de suma importancia. Cualquier gotera en los cajones o tubos de acceso debe ser reparada inmediatamente. Es útil contar con dos llaves externas tipo bolita. Una controla y cierra el flujo de nutrientes hacia los cajones. La otra se abre solo para cambiar la solución nutritiva. Ayuda a vaciar restos de la solución hacia fuera, hasta que el tanque quede vacío. Esto también ayuda a facilitar el “cebado” de la bomba antes que empiece a funcionar. El agujero de desagüe debe estar localizado en el extremo más bajo de cada cajón y debe quedar adecuadamente sellado (Figura 25). Una bomba de repuesto debe estar disponible en caso de que falle alguna, aunque esta situación rara vez ocurre. La instalación de tanque, bomba y tubería se pueden observar en las figuras 24, 25, 26 y 27.



Figura 24 Instalación externa del tanque y bomba. La llave azul encima de la bomba sirve para vaciar la solución nutritiva del tanque. La llave general (cerca del filtro negro) necesita estar cerrada. Módulo aeropónico en Njuli-Malawi.



Figura 25 Detalle del sumidero de desagüe en el piso del cajón. Un sumidero de lavatorio se acopla a través del plástico negro y la tubería de desagüe que conecta al tanque.

Programador de tiempo y otros componentes

Existen programadores de tiempo (*timers*) que pueden ser calibrados cada 10 segundos. Además de ser costosos, no siempre se encuentran en el mercado local y requieren de complicados procesos de programación que pueden alterarse si se producen frecuentes cortes de energía. En el CIP-Huancayo se han usado programadores manuales que pueden calibrarse para que funcionen cada 15 minutos. Estos programadores deben considerarse en aquellos lugares donde no hay apoyo técnico. Farran y Mingo- Castell (2006) usaron *timers* calibrados para que el sistema funcione 10 segundos, cada 20 minutos. Durante las noches frías es suficiente que el sistema funcione 15 minutos, cada hora. Durante el día se puede programar para un funcionamiento de 15 minutos x 15 minutos de periodo inactivo. En cuanto a los nebulizadores, existen muchos modelos. Usualmente se venden en tiendas especializadas en equipos de riego o de invernaderos. Su precio no es alto, por lo que conviene comprar 1 de cada uno a modo de prueba y luego optar por el que más conviene. Se deben tener a la mano nebulizadores nuevos y limpios para cambiar los nebulizadores obstruidos. Estos se pueden limpiar posteriormente. Respecto al generador, si no se tiene uno que funcione automáticamente cuando se corta el fluido eléctrico, se debe implementar un sistema de alarma que permita encender el generador alterno, especialmente los fines de semana. Esto es crucial en lugares con servicio deficiente de energía eléctrica.



Figura 26 Tubos alimentadores con llaves independientes.



Figura 27 Tubos alimentadores para cajones anchos.

Solución nutritiva

Fuentes de nutrientes

Cada cultivo tiene un requerimiento óptimo de nutrientes. Cada cultivar de papa puede requerir diferente solución nutritiva. Esto también depende de la calidad química del agua y de los nutrientes usados para la solución nutritiva. Cuando añadimos nutrientes al agua, la CE sube. En general no debemos tener una CE mayor a 2.0 MiliSiemens por cm (mS/cm) si queremos evitar problemas de fitotoxicidad. Tanto en hidroponía como en aeroponía, las fuentes de nutrientes son fertilizantes comunes que se pueden encontrar en el mercado. En el Cuadro 2 se muestra una lista de diferentes nutrientes. No debemos usar fertilizantes que contengan sodio (Na) o cloro (Cl). Hay fertilizantes que incrementan la CE más que otros. Los fertilizantes con nitrógeno (N) y potasio (K) son buenos aportantes de CE. Existen también fertilizantes que contribuyen en mayor o menor grado a la alcalinidad o acidez de la solución. Es conveniente tener esta información. Entre los fertilizantes acidificantes se encuentran: fosfato de amonio, sulfato de amonio, úrea y nitrato de amonio. Entre los fertilizantes alcalinizantes se encuentran: fosfato de calcio, carbonato de potasio, fosfato de potasio, nitrato de potasio. También es conveniente chequear el pH del agua y de la solución nutritiva. Las plantas necesitan macronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg); también micronutrientes: hierro (Fe), azufre (S), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), boro (B) y molibdeno (Mo) para su crecimiento normal. Estos elementos deben estar disueltos en agua para que las plantas los aprovechen y absorban mediante su sistema radicular. Un pH óptimo permite la máxima disponibilidad de nutrientes para las

Cuadro 2. Sales y minerales usados como fuentes nutritivas para hidroponía y aeroponía.

MACRONUTRIENTES				
Sal o fertilizante	Fórmula	Peso molecular	Nutrientes	Concentración (%)
Nitrato de potasio	KNO ₃	101	K	13.0
			NO ₃	13.0
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236	Ca	17.0
			NO ₃	12.0
Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	256	Mg	9.5
			NO ₃	11.0
Fosfato de amonio	NH ₄ H ₂ PO ₄	115	NO ₄	12.0
			P	27.0
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	132	N-NH ₄	21.0
			S	24.0
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	80	NO ₃	16.5
			NO ₄	16.5
Fosfato de potasio	KH ₂ PO ₄	136	K	29.0
			P	23.0
Cloruro de potasio	KCl	75	K	52.0

Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	174	K	41.0
			S	17.0
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ ·7H ₂ O	247	Mg	10.0
			S	13.0

MICRONUTRIENTES

Sulfato de hierro	FeSO ₄	153	Fe	20.0
FeEDTA (Disolvine)	Fe-EDTA	430	Fe	13.0
FeEDTA (Arbore Fe)			Fe	4.0
FeEDDHA (Ferrilene)			Fe	6.0
Ácido bórico	H ₃ BO ₃		B	17.0
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	381	B	11.0
Sulfato de Cu	CuSO ₄	161	Cu	13.0
			S	12.0
MnEDTA	Mn-EDTA	366	Mn	15.0
Sulfato de zinc	ZnSO ₄	161	Zn	22.0
			S	22.0
Cloruro de zinc	ZnCl ₂	136	Zn	45.0
Ácido molibdico	H ₂ MoO ₄ ·H ₂ O	180	Mo	66.0

plantas. Solo los fertilizantes previamente probados deben usarse en aeroponía. No siempre todos los fertilizantes suelen encontrarse en todo sitio. En el Cuadro 3 se muestran las soluciones nutritivas usadas para producir semilla de papa aeropónica.

Cuadro 3. Soluciones nutritivas usadas para producción de semilla de papa aeropónica

<i>Ferran et al.</i>		<i>Otazú et al.</i>	
Nutriente	Concentración	Nutriente	Concentración
KNO ₃	0.4 me/l	KNO ₃	5.40 me/l
Ca(NO ₃) ₂	3.1 me/l	NH ₄ NO ₃	4.40 me/l
NH ₄ NO ₃	4.4 me/l	Superfosfato de Ca	2.60 me/l
KH ₂ PO ₄	4.4 me/l	MgSO ₄	1.00 me/l
MgSO ₄	1.5 me/l	Fe(EDTA-Fe 6%)	8 ppm
		B ((Ácido bórico))	1 ppm
		Micro (Fetrilon*)	12 ppm
pH 5.7		pH 6.5	

*Fetrilom combi es un nutriente foliar comercial en polvo que tiene la siguiente formulación: 9% MgO, 3% S, 4% Fe, 4% Mn, 1.5% Cu, 1.5% Zn, 0.5% B, and 0.1% Mo.

Cómo calcular la concentración de nutrientes

La concentración de macronutrientes usualmente se expresa como milimoles/litro o miliequivalentes/litro (me/l). También se puede expresar como gramos/litro (g/l), o como porcentaje (%) de N, P205 y K20. La concentración de micronutrientes se expresa en miligramos/litro (mg/l) o, lo que es lo mismo, en partes por millón (ppm). Es útil entender ciertos términos químicos para preparar la solución nutritiva. El peso molecular es la suma de los pesos atómicos en gramos de los átomos que son parte de la fórmula del compuesto químico. El número equivalente se obtiene dividiendo el peso del compuesto en g entre su peso equivalente. El peso equivalente se calcula dividiendo el peso molecular entre su valencia. Un miliequivalente es la 1/1000 de un equivalente. Usando la información del cuadro 2 podremos calcular el peso equivalente del nitrato de Ca (118), del nitrato de amonio (80), del fosfato de K (136.1) y del sulfato de K (87.2). Esto mismo se puede expresar también en g/l. (Cuadro 4).

Cuadro 4. Concentración de fertilizantes expresados en 2 tipos de medida.

Fertilizante	Fórmula	me/l	g/l
Nitrato de K	KNO₃	1	0.101
Nitrato de NH ₄	NH ₄ NO ₃	1	0.080
Sulfato de K	K ₂ SO ₄	1	0.087
Sulfato de Mg	MgSO ₄	1	0.247
Fosfato de K	KH ₂ PO ₄	1	0.136
Superfosfato triple de Ca	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1	0.117

El análisis químico del agua ayuda a ajustar la solución nutritiva. La mayoría de fuentes de agua tiene suficiente boro (B). Las plantas requieren sólo cantidades mínimas de este elemento. Si el agua es absolutamente carente de B, podemos comprar ácido bórico en cualquier farmacia (pues es usado para el tratamiento de hongos en los pies). Disolver 0.1g. en 1 litro de agua y añadir al tanque de 100 litros. Para 400 litros necesitaremos 0.4g. En nuestra formulación, el Fertilon Combi ya contiene B. El análisis de agua no solo nos sirve para darnos información sobre su calidad, sino también para poder ajustar con precisión el contenido de los componentes nutricionales. Cadhia brinda el siguiente ejemplo para preparar una solución de Hoagland con cierta fuente de agua cuyo análisis se conoce (Cuadro 5).

Cuadro 5. Composición química del agua, solución ideal y reajuste para preparar una solución de Hoagland en milimoles/l. (Adaptado de Cadhia, 2)

	NO ³⁻	H ₂ PO ⁴⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ³⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Agua	-	-	1.0	3.5	1.0	-	-	2.0	2.0	1.5
Solución Hoagland	14.0	1.0	4.0	-	-	1.0	6.0	8.0	4.0	-
Reajuste	-	-	+3	-3*	-	-	-	+6	+2	-

*Equivalente a añadir 3.0 me H⁺ (acid), se deja 0.5 me/l de HCO₃⁻ como fuente bufer para otros ácidos.

Preparación de nutrientes

Si quisiéramos preparar una solución nutritiva para un tanque de 400 litros, el siguiente cuadro será de utilidad:

Cuadro 4. Nutrientes requeridos para un módulo aeropónico de papa de 400 litros.

Nutrientes	Concentración(me/l)	g/l	g/400 l
Nitrato de K	5.40	0.54	216
Nitrato de NH ₄ *	4.40	0.35	140
Superfosfato triple de Ca.	2.60	0.28	112
Sulfato de Mg	1.00	0.24	96
Fetrilon combi	12 ppm	0.012	4.8
Quelato de Fe (6%), optional	9 ppp	0.009	3.6

* A ser reducido en ½ cuando empieza la tuberización (cerca de los 2 meses del trasplante).

Todos los nutrientes son fácilmente disueltos en agua, a excepción del superfosfato de Ca. Los nutrientes deben ser disueltos separadamente en pequeños volúmenes de agua hasta su completa disolución. Algunas veces se puede requerir filtrado previo para eliminar impurezas antes de verterlo al tanque de nutrientes. Para diluir el superfosfato de Ca se puede usar un pedazo de malla antiáfida. En ella se coloca el producto y en un recipiente con agua se procede a estrujar la malla con el contenido hasta que poco a poco desaparezca. Luego hay que esperar hasta que la solución se estabilice. Descartar las impurezas no diluidas que quedan al fondo. La otra opción es filtrar la solución, pero esto demora más tiempo. Usar agua un poco caliente también ayuda a diluir este nutriente. Si se van a usar nutrientes nuevos, es necesario probarlos previamente. Las fuentes nuevas de micronutrientes, al no ser compatibles con otros nutrientes de la mezcla, pueden causar fototoxicidad. En los primeros días preparar solo para 100 litros y añadir agua para completar el volumen a 200 litros. Después de la segunda semana la solución debe ser completa y para los 400 litros. La aparición de cualquier síntoma de fitotoxicidad en las hojas indicará que la solución no es compatible y debe ser cambiada inmediatamente. Un pH óptimo permite la máxima disponibilidad de nutrientes para las plantas. Si el pH de la solución nutritiva es mayor a 7.3 se le puede bajar con una solución diluida de ácido sulfúrico o ácido fosfórico a un pH ligeramente ácido (6.8).

Métodos alternativos de preparación

La Universidad Agraria La Molina del Perú vende comercialmente soluciones stock de nutrientes. En el CIP estas soluciones fueron empleadas para hidroponía, pero también se pueden usar para aeroponía. Se describe seguidamente la forma de preparación de estos nutrientes:

Se prepara una solución stock concentrada para macronutrientes (Solución stock A) y otra para micronutrientes (solución stock B) y se mantienen en depósitos separados hasta preparar la solución final.

Solución stock A

- En un recipiente de plástico poner 180 g de superfosfato triple de Ca con suficiente agua (500ml.) durante 24 horas.
- Con un mortero, triturar los gránulos hasta que todo quede disuelto. Descartar el material inerte que queda. El volumen final debe ser de 5 litros.
- En un recipiente separado añadir 550g. de nitrato de K con 3 litros de agua, que debe disolverse rápidamente.
- Al mismo recipiente añadirle 350gr. de nitrato de amonio y disolverlo.
- Mezclar los contenidos de ambos recipientes y ajustar el volumen final a 5 litros. Mantener esta solución en una botella opaca marcada como “solución A”.

Solución stock B

- Preparar los micronutrientes en 1 litro de agua destilada: En unos 300 ml. de agua, añadir los siguientes componentes: 1g. de sulfato de Cu, 1.7g. de sulfato de Zn, 0.2g. de molibdato de amonio, 3g. de ácido bórico y 5g de sulfato de Mn (en ese orden). Completar el volumen final a 1 litro con agua destilada. Mantener esta solución en una botella limpia.
- En 1 litro de agua disolver 220g. de sulfato de Mg.
- A esta solución añadirle 400ml. de la solución de micronutrientes y mezclar bien.
- Añadir 17g. de chelato de hierro (Fe-EDTA, 6% Fe).
- Añadir suficiente agua para completar el volumen final a 2 litros. Marcar este recipiente como “solución B”.

Preparación Final:

Antes de hacer la mezcla final, sacudir ambas soluciones. Para la concentración final, mezclar 5 ml. de la solución A con 2 ml. de la solución B para cada litro de solución nutritiva. Para 100 litros de solución nutritiva mezclaremos 500ml. de solución A con 200ml. de solución B, y similarmente así para otros volúmenes.

Nitrato de Calcio

En algunos países, el nitrato de amonio no se encuentra disponible porque también se usa ilegalmente para la confección de explosivos. Por lo tanto debemos contar con otra alternativa de solución nutritiva. En la Isla Mauricio se usa la siguiente solución nutritiva (*G. Triton, comunicación personal*): Se prepara una solución stock en 10 lt de agua con los siguientes componentes:

Nutrientes	g
Nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	118
Fosfato de potasio (KH_2PO_4)	68
Nitrato de potasio (KNO_3)	252
Sulfato de magnesio (MgSO_4)	246
Hierro (Fe-EDTA)	11.7
Boro (H_3BO_3)	0.7

Cloruro de manganeso (MnCl ₂)	1.5
Sulfato de zinc (ZnSO ₄)	0.3
Sulfato de cobre (CuSO ₄)	0.1
Molibdeno (Mo)	0.1

Para cada litro de solución nutritiva añadir 20 ml de solución stock. (2%).

Para 100 litros de solución nutritiva, añadir 2 litros de solución stock, etc.

Manejo de plantas y nutrientes

Cuando las plantas estén listas para ser transplantadas a aeroponía, deben extraerse cuidadosamente de las bandejas de arena. Las pinzas grandes son de gran ayuda para este fin. Una brocha fina sirve para limpiar las raíces de la arena. También se puede usar un atomizador manual. El agua a presión limpia la arena sin causar daño a las raicillas. Un trozo de esponja se envuelve alrededor del cuello de cada plántula y se coloca en los agujeros de las tapas de cajones. Con un par de pinzas se procede a empujar la esponja con la planta hacia abajo hasta que la raíz quede totalmente expuesta a la neblina de la solución nutritiva. Después del trasplante pueda que sea necesario colocar una lámina de plástico negro (bloqueador de luz) alrededor de cada planta transplantada para evitar la entrada de luz a los cajones. Cuando se haya terminado el trasplante, se debe buscar y eliminar cualquier puerta de entrada de luz al interior de los cajones y asegurarse que todas las raíces estén convenientemente expuestas a la solución nebulizada. Luego se deben preparar los soportes. Inicialmente, las plantas se pueden sostener por 2 a 3 semanas. Después de este tiempo las plantas desarrollan rápidamente y requerirán soportes ya sea en forma de estacas (Figura 27) o mallas de alambre o nylon (Figuras 28, 29). La rafia agrícola es lo más barato para este fin. Después de 1 mes del trasplante, las hojas inferiores deben ser removidas con un bisturí, siguiendo estrictas normas de asepsia. Si se nota el desarrollo de estolones en la parte superior del sistema radicular, se debe bajar inmediatamente las plantas. Algunos cultivares tienden a formar estolones superficiales y pueden formarse dentro del tubo pvc. Si no bajamos la esponja por debajo de la tapa de tecnopor, pueden formarse uno o más tuberculillos dentro del tubo de pvc, apretando y estrangulando el tallo de la planta, llegando a matarla. El proceso de bajado de tallos es importante y es equivalente al aporque en el campo. Cuando acabamos con este proceso, las plantas estarán libres, sin soporte alguno. Por lo tanto las plantas deben sujetarse adecuadamente a estacas u otros mecanismos de soporte como las mallas de soporte. En esta etapa también es importante evitar cualquier entrada de luz al interior de los cajones. Un segundo bloqueador de luz hecho de plástico más grueso puede ser de utilidad. Se recomienda sacar muestras foliares para someterlas a pruebas de ELISA y determinar si hay alguna contaminación viral. La solución nutritiva debe ser chequeada regularmente. La CE y el pH son indicadores útiles. La CE no debe exceder de 2.0mS/cm. El pH no debe exceder de 7.3. Para bajar el pH a un rango ligeramente ácido (6.5-6.8) se debe usar ácido fosfórico diluido. La solución nutritiva debe cambiarse cada mes. Esto se debe hacer usando la bomba monitoreando las 2 llaves (Figura 24). Cerrar la llave principal (celestes) y abrir la llave lateral (azul) para desaguar la solución a descartar. Después, cuando las plantas desarrollan abundante follaje, el consumo de nutrientes aumenta. Si se nota un consumo excesivo de nutrientes es casi seguro que hay fuga por algún lugar en el plástico, que debe detectarse y corregirse inmediatamente. Un filtro de malla colocado al final del tubo de



Figura 27 Las plantas pueden necesitar diferentes tipos de soporte como estacas o alambre. Algunos cultivares desarrollan abundante follaje.

Figura 28 Un sistema de soporte con alambre usado en Malawi.



Figura 29 Malla de soporte de nylon usada en GTIL-Nairobi.

desagüe en el tanque es útil para retener trozos de raíces y otras impurezas que se pueden desprender del sistema (tecnopor, plástico, etc.). Un retazo de malla antiáfida sujetado en el tubo de desagüe funciona bien para retener estas impurezas. El filtro negro requiere mantenimiento regular (cada mes).

Cuando la campaña ha concluido, se debe realizar una operación general de limpieza y desinfección en tanques, cajones, tuberías y nebulizadores. Las sales tienden a acumularse en los filtros y nebulizadores. Un ácido débil como el ácido acético o una solución diluida de ácido sulfúrico son eficientes en la remoción de estas sales. Una preparación de 50 litros de 2 % de hipoclorito de Ca o de Na debe circularse por el sistema con la bomba funcionando por 15 minutos, seguido de 2 o 3 enjuagues con agua.

Cosecha y almacenamiento

Dos meses después del trasplante los cultivares precoces empiezan a producir tuberculillos. Podemos empezar a cosechar tuberculillos con 8 g o más (Figura 31). Debemos abrir primero la cortina externa y luego muy cuidadosamente la cortina interna para así evitar daños al sistema radicular de las plantas. Las cosechas se deben programar para horas de la mañana cuando el ambiente es aún fresco. Los programadores de tiempo se pueden paralizar por media hora a la vez. Las cosechas se pueden planificar cada 10 a 14 días después de la primera. La cosecha de tuberculillos obtenidos aeropónicamente es diferente a la cosecha de tuberculillos convencionales. La diferencia básica es que en aeroponía se realizan cosechas secuenciales, mientras que en el método convencional se realiza una sola cosecha final. Dependiendo del cultivar, en aeroponía se realizan varias cosechas, que pueden ser 10 o más. Cada vez que se coseche, se deben tratar los tuberculillos con una solución de 0.1 % de hipoclorito de Na, seguido de 1 o 2 enjuagues con agua. Esto se hace como medida de precaución para evitar contaminaciones bacteriales. Si hemos seguido estrictamente las medidas sanitarias durante la campaña, no debemos tener problemas sanitarios que requieran el uso de otros pesticidas. Seguidamente, los tubérculos deben colocarse en ambientes secos y limpios para un proceso de curado por 2 o 3 semanas antes de su ubicación final en almacenes refrigerados o de luz difusa. Antes de esto, los tuberculillos deben ser escogidos y separados de acuerdo a su tamaño (Figura 32).

Una gran desventaja de las cosechas secuenciales es que cuando se terminan, se tiene un lote de semilla desuniforme en lo que concierne a brotamiento de tubérculos: Los tubérculos cosechados en los primeros meses brotarán antes que los cosechados en los últimos meses. Esto también causará una emergencia irregular en el campo. Aunque esta irregularidad no parece afectar el rendimiento, se puede corregir en parte conservando en almacenes fríos los tubérculos cosechados primero y 1 mes antes de la última cosecha se pueden poner todos en un almacén de luz difusa. Los tuberculillos más pequeños (1g a 2g) se pueden usar en multiplicación convencional (macetas o camas).



Figure 31
Tuberculillos
aeropónicos del
cultivar Canchán,
recién cosechados.



Figure 32
Tuberculillos
aeropónicos de 3
tamaños (cultivares
Cruza y Canchán)
(izquierda). Jabas
cubiertas con malla
antiáfida en un
almacén con luz
difusa (derecha).

Referencias

Boersig, M.R., and Wagner, S.A. 1988. Hydroponic system for production of seed tubers, *American Potato Journal* 65:470-71.

Cadhia, C. 1998. *Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales*, Ed. Mundi-Prensa. Barcelona, España. 475 p.

Chuquillanqui, C., Tenorio, J., y Salazar, L. 2007. Producción de semilla de papa por hidroponía. En: "Alternativas al uso de bromuro de Metilo en la producción de semilla de papa de calidad". Lima (Perú) CIP. Documento de trabajo 2007-2. pp 26-34.

CIP División de Manejo Integrado de Cultivos 2008. Alternativas al uso de bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad. Lima (Perú). CIP. 53p. Documentos de trabajo 2007-2.

Duarte, R., y Hidalgo O. 1997. Diseño de invernaderos para la producción de semilla de papa en condiciones de sierra. En: "Producción de tubérculos semillas de papa". O. Hidalgo (ed). CIP Manual de capacitación. Lima-Perú. Fascículo 4.4.

Farran, I., andMingo-Castel, A.M. 2006. Potato minituber production using aeroponics: Effects of Plant density and harvesting intervals. *Amer J of Potato Res* 83:47-53.

Gullino, M.L., Camponogara, A., Gasparrini, G., Rizzo, V., Clini, C., and Garibaldi, A. 2003. Replacing methyl bromide for soil disinfestations. *Plant Disease* 87:1012-21.

He, J., y Lee, S.K. 1998. Growth and photosynthetic responses of three aeroponically grown lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.) to different rootzone temperatures and growth irradiances under tropical aerial conditions. *J. Hort Sci Biotech* 73:173-80.

Maldonado, L., Thiele, G., y Otazú, V. 2008. Análisis de costos entre el sistema convencional de producción de semilla de papa de calidad y el sistema por aeroponía. En: "Alternativas al uso del bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad". Lima (Perú). CIP. Documento de trabajo 2007-2, pp 46-53.

Otazú, V. 2008. Esterilización de sustratos de invernadero por vapor. En: "Alternativas al uso del bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad". Lima (Perú) CIP. Documento de trabajo 2007-2 pp 15-25.

Otazu, V. 2008. Producción de semilla de calidad en invernaderos para la zona andina. (en prensa).

Otazu, V., Barker, I., and Chujoy, E. 2008. Innovation in seed potato production for developing countries using aeroponics. Conference Potato Science for the Poor. 25-28 March. Cusco-Peru.

Otazú, V., y Chuquillanqui, C. 2007. Producción de semilla de papa de calidad por aeroponía. En: "Alternativas al uso del bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad": Lima (Perú) CIP. Documento de trabajo 22007-2. pp 35-45.

Rolot, J.L., and Seutin, H. 1999. Soilless production of Potato minitubers using hydroponic technique. Potato Res. 42:457-469.

Soffer, H., and Burger, D.H. 1988. Effects of dissolved oxygen concentration in aero-hydroponics on the formation and growth of adventitious roots. J Am Soc Hortic Sci 113:218-21

APÉNDICE

TÉRMINOS TÉCNICOS USADOS EN AEROPONÍA

Amonio cuaternario: Ingrediente activo de varios desinfectantes comerciales. Tiene varios sinónimos, siendo el cloruro de benzalkonio el más conocido.

Antecámara: Infraestructura importante ubicada a la entrada del invernadero. Sirve para disminuir las posibilidades de contaminación de las plantas al interior del invernadero.

Asepsia: Limpieza. Implica medidas que evitan la contaminación de cualquier tipo.

Blanqueador: Lejía.

Cajón: Contenedor completamente oscuro que alberga el sistema radicular de las plantas.

Codo de unión: En gasfitería, una pieza de tubo que sirve de unión y tiene forma de L, puede ser de PVC o metal.

Conductividad eléctrica: (CE), estima el total de sales disueltas o la cantidad total de iones disueltos en el agua.

Follaje: Tallos, hojas y ramas de la planta.

Hipoclorito de sodio (calcio): Usado comúnmente como blanqueador o desinfectante.

Lejía: Solución comercial con 3 a 6% de hipoclorito de sodio (Na Cl), comúnmente usada como blanqueador o desinfectante.

Macronutrientes: Elementos esenciales que necesitan las plantas en cantidades relativamente grandes para su crecimiento. En general se consideran macronutrientes al nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

Malla antiáfida: Una malla hecha usualmente de polietileno, nylon o material acrílico que no permite la entrada de áfidos al invernadero. Viene en colores claros y en anchos diversos.

Malla sombreadora: Son mallas que van sobre o debajo del techo del invernadero con el objetivo de dar sombra a las plantas y bajar la temperatura interna del invernadero. Evitan el traspaso de luz en diferentes porcentajes.

Micronutrientes: Elementos esenciales requeridos por las plantas para su crecimiento, pero en cantidades muy pequeñas. Estos incluyen: azufre (S), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu),

hierro (Fe), cloro (Cl), cobalto (Co), molibdeno (Mo) y zinc (Zn).

Nebulizador: Boquillas que a determinada presión nebulizan la solución nutritiva.

Niple: Una pieza de tubo corto y recto que sirva para conectar la tubería.

pH: Medida de acidez o basicidad de una solución. Es la concentración de iones o cationes H⁺.

Plántulas *in vitro*: Plantas (usualmente libres de patógenos) producidas en condiciones de laboratorio en tubos de ensayo o en ambientes controlados, fuera del organismo vivo. Vienen en tubos o magentas.

Plástico: Material de polietileno que viene en diferentes composiciones y grosores. Se usa para techos de invernaderos y para forrar los cajones de aeroponía.

Policarbonato: Un tipo de plástico rígido transparente que viene en planchas corrugadas y es usado en techos de invernaderos.

PVC: Cloruro de polivinilo (*polyvinilchloride*). Material ampliamente usado como componente de gasfitería, mayormente en tuberías y uniones.

Semilla prebásica: Semilla de papa producida en el invernadero sin incidencia de plagas ni enfermedades.

Tecnopor: Espuma blanca de poliestireno manufacturada como material aislante térmico. Usualmente viene en planchas de 2.40 x 1.20m. en diferentes grosores y densidades.

Unión de reducción: Una unión de PVC o metal que conecta a un tubo de menor diámetro.

Carta de principales problemas y soluciones pueden ocurrir en aeroponía

Problema (síntoma) General	Probable causa	Solución
Plántulas <i>in vitro</i> , amarillentas	Plantas mantenidas por mucho tiempo en oscuridad	Poner plantas bajo luz antes de su trasplante
Plántulas en camas de arena, ahiladas	Mucho calor en el ambiente o falta de luz	Descartar la causa antes de poner malla sombreadora
Plántulas flácidas en cajones (la mayoría)	Falta de presión, electro bomba inadecuada, filtro obstruido. Válvula de succión obstruida	Cambiar electro bomba. Limpiar filtro. Limpiar válvula de succión
Algunas plantas marchitas	Nebulizador adyacente obstruido	Cambiar (limpiar) nebulizador
Planta marchita con abundante nebulización	Tallo quebrado en esponja	Sacar planta, reemplazarla
Tanque vacío antes de tiempo	Fuga de solución nutritiva. Tubo de drenaje (desagüe) atorado	Parchar el plástico. Desatorar el sistema de desagüe
Plántulas empiezan a presentar síntomas de quemado foliar	Solución nutritiva mal preparada. Fuente de agua inadecuada. Invernadero muy caliente	Cambiar solución nutritiva, cambiar fuente de agua. Refrigerar solución nutritiva
Plantas con síntomas foliares	Patológico. <i>Phytophthora</i> y <i>Oidium</i> son patógenos más frecuentes.	Identificar patógeno y aplicar productos con mitad de dosis recomendada
Solución nutritiva con pH muy alto (mayor a 7.4)	Fuentes de nutrientes/agua muy alcalinos	Bajar pH con ácido, hasta pH entre 6 a 7
Solución nutritiva con pH muy bajo (alrededor de 5)	Solución nutritiva desgastada	Cambiar con solución nutritiva fresca
Solución nutritiva con CE muy alta (mayor a 2mS/cm)	Fuentes de nutrientes/agua muy alcalinos	Aumentar agua hasta bajar CE a 2 o menos
Mediciones de pH o CE incongruentes en solución nutritiva	Medidores de pH/CE mal calibrados	Calibrar medidores

C E N T R O I N T E R N A C I O N A L D E L A P A P A



Misión del CIP

El Centro Internacional de la Papa (CIP) trabaja con sus socios para alcanzar la seguridad alimentaria, el bienestar y la equidad de género para las personas pobres mediante las raíces y tubérculos y los sistemas agrícolas en el mundo en desarrollo. Para lograrlo, realizamos investigación e innovación en la ciencia, tecnología y fortalecimiento de las capacidades



Visión del CIP

Nuestra visión es mejorar las condiciones de vida de los pobres a través de las raíces y tubérculos.

El CIP es apoyado por un grupo de gobiernos, fundaciones privadas y organizaciones internacionales y regionales conocidas como el Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional (CGIAR).

www.cgiar.org