

CAPÍTULO 4



INFRAESTRUCTURA

Byron Potosí





■ ¿QUÉ NOS PROPONEMOS EN ESTE CAPÍTULO?

- Describir los detalles de la infraestructura necesarios para el funcionamiento de la aeroponía, de tal manera que el técnico de implementación pueda diseñar, contratar y supervisar su construcción y mantenimiento.
- Compartir los resultados y los aprendizajes que se produjeron en Ecuador, Colombia y Perú.



¿QUÉ INFRAESTRUCTURA SE NECESITA PARA IMPLEMENTAR AEROPONÍA?

Este tema requiere que se aborden los siguientes aspectos:

- Selección del sitio
- Recursos humanos
- Invernadero y otras instalaciones
- Módulos de aeroponía
- Sistema de riego

SELECCIÓN DEL SITIO

Para obtener buenos resultados en aeroponía es importante elegir un sitio adecuado para instalar la infraestructura.

Estos criterios pueden ser útiles:

Clima adecuado

En la zona andina, el clima está muy influenciado por la altitud y en menor grado por la latitud. Se ha logrado una buena producción de papa mediante aeroponía en invernaderos instalados entre 2600 y 3500 msnm, sin sistemas sofisticados de control de ambiente. A estas altitudes es posible mantener dentro del invernadero, durante al menos 6 meses, una temperatura promedio diaria de entre 18 y 25°C durante el día y de entre 8 y 15°C durante la noche. La temperatura máxima dentro del invernadero no debe ser mayor a 30°C²⁹ y la mínima no debe ser menor a 4°C.

Suministro permanente de energía eléctrica

Es un factor fundamental de la aeroponía ya que es imprescindible para el funcionamiento del sistema de riego. Por esta razón se debe contar con una fuente segura de provisión de energía eléctrica y una fuente alterna en caso de emergencia (generador eléctrico).

Disponibilidad de agua de riego

Debe haber agua de buena calidad, en la cantidad suficiente y de forma estable.

En zonas planas y en suelos nivelados con buen drenaje

Para evitar la acumulación de agua y masas de aire frío, que ocurre en las hondonadas.

Fácil acceso

Para facilitar la construcción de la infraestructura, así como el ingreso y la salida de materiales y personal.

²⁹ En CIP-Quito se han registrado temperaturas entre 35 y 37°C dentro del invernadero al mediodía. Las plantas tienden a marchitarse, pero en horas de la tarde se recuperan.

Lejos de zonas polvorientas

En lo posible, el sitio elegido debe estar lejos de zonas polvorientas, debido a que el polvo se deposita en los techos, disminuyendo el paso de luz al interior, además de contaminar las plantas.

Cerca de zonas habitables

Donde pueda vivir el personal encargado para evitar largos traslados y, en caso de ser necesario, pueda responder rápidamente para solucionar cualquier problema que se presente en el cultivo o en alguno de los componentes de la infraestructura.

Protegido de vientos fuertes

Para que no dañen la infraestructura.

Lejos de obstáculos que causen sombra

Para poder aprovechar al máximo la luz solar.

Con seguridad

Para evitar el robo o el daño de las instalaciones.

Alejado de otros cultivos de papa

Para reducir el riesgo de transmisión de enfermedades y plagas al cultivo aeropónico.

Con suficiente área adicional

Para posibles planes de expansión en el futuro.

RECURSOS HUMANOS

La construcción e instalación de la infraestructura para implementar aeroponía requiere ayuda especializada. La supervisión es responsabilidad del técnico de implementación, mientras que la construcción e instalación en sí, estará a cargo de técnicos y obreros especializados.

Dependiendo de la escala, la construcción del invernadero se podrá hacer con obreros especializados en construcción de invernaderos, o mediante la contratación de empresas especializadas.

Para la construcción de la estructura de los módulos de aeroponía se requiere de un carpintero o de un cerrajero, según la estructura sea de madera o de metal. La colocación de las láminas de aislante y plástico no es compleja, por lo que la puede realizar el operario del invernadero.

Para la instalación del sistema de riego es necesario contar con asesoramiento de un técnico y de obreros especializados (plomero y electricista).

INVERNADERO Y OTRAS INSTALACIONES

Invernadero o casa de malla

Un invernadero es una instalación cubierta con materiales transparentes, que dejan pasar los rayos solares para que se caliente el ambiente interior y se realice la fotosíntesis de las plantas. Además las protege de la acción de lluvias, heladas, granizo, pájaros, insectos plaga, etc.

Dependiendo de su diseño, un invernadero permite cierto nivel de control de la temperatura, la luz y la humedad relativa, lo cual beneficia el desarrollo del cultivo.

En los Andes y en otras zonas tropicales altas se puede producir papa en invernaderos sencillos, durante la mayor parte del año, sin costosos sistemas de control de ambiente. Por supuesto, se pueden construir invernaderos más sofisticados, pero sería un gasto innecesario debido a las condiciones climáticas adecuadas de la zona para este tipo de cultivo.

El invernadero que se recomienda para aeroponía en la zona andina es una construcción relativamente sencilla, que está constituida por:

- una estructura de soporte,
- cubierta y
- paredes de malla antiáfido.

A este tipo de invernadero se lo conoce como *casa de malla*, porque las paredes son de malla en lugar de vidrio o de plástico, como en otros invernaderos.

Foto: Byron Potosi.



Casa de malla en el CIP-Quito, Ecuador.

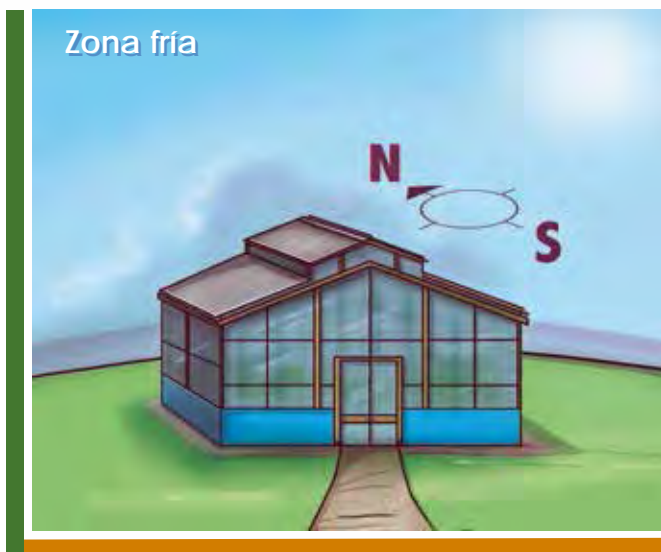
De aquí en adelante se mencionarán recomendaciones generales para la construcción de una casa de malla. Especificaciones más detalladas se pueden encontrar en textos especializados para construcción de invernaderos.

Orientación

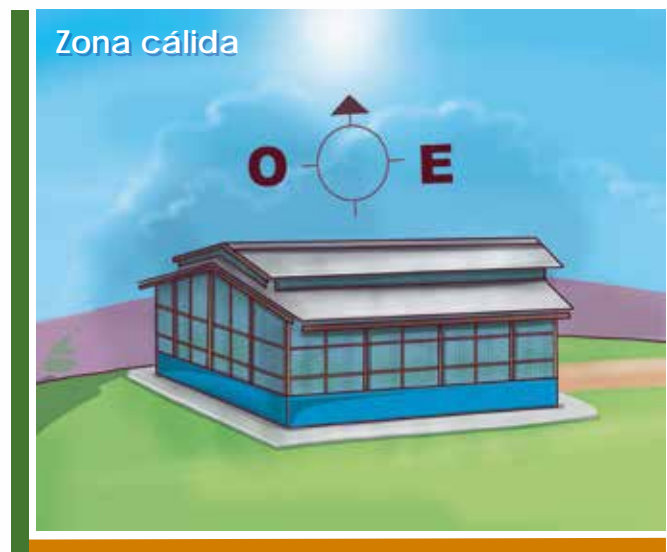
La orientación de la casa de malla, (norte-sur o este-oeste) es importante para tener condiciones ambientales apropiadas.

En general, el factor más importante para orientar adecuadamente una casa de malla es la temperatura, definida por el movimiento del sol durante el día.

El techo de las casas de malla ubicadas en países de la región andina, ofrece mayor superficie de calentamiento si está orientado de norte a sur, lo cual es recomendable para zonas frías. Por el contrario, para zonas cálidas, se recomienda una orientación de este a oeste para disminuir el calor, en especial, en las tardes de días soleados.



Orientación de una casa de malla ubicada en la región andina, en zonas frías.



Orientación de una casa de malla ubicada en la región andina, en zonas cálidas.

Otros factores, como dirección del viento, presencia de obstáculos, etc., se pueden considerar también al momento de orientar una casa de malla.

Ancho

Esto depende del número de módulos de aeroponía que se vayan a construir, lo cual, a su vez, está definido por la cantidad de minitubérculos que se espera producir. En la zona andina algunas de las casas de malla usadas para aeroponía tienen un ancho que varía entre 5 y 20 m.

Largo

De igual manera, el largo depende del número de módulos que se vayan a construir. En la zona andina, algunas de las casas de malla usadas para aeroponía tienen un largo que varía entre 15 y 40 m.

Altura

Una casa de malla con techo alto ayuda al enfriamiento interno en horas de calor, por lo que se recomienda para zonas cálidas. Por el contrario, los invernaderos con techo bajo son más calientes, por lo que se recomiendan para zonas frías.

Aunque se han realizado experiencias con casas de malla de 2,6 m de altura en su parte más baja, la recomendada para cultivar papa mediante aeroponía, es de **4,5 m** para brindar el espacio y las condiciones ambientales adecuadas al desarrollo del cultivo, en especial con variedades del tipo *andigena* que tienden a desarrollar alturas cercanas a los 2 m en aeroponía.



Altura recomendada de una casa de malla para aeroponía.

Estructura de la casa de malla

La estructura es el armazón de la casa de malla constituida por cimientos, vigas, cables, etc., que soportan la cubierta y otros implementos.

Debe reunir las siguientes condiciones:

- Ser ligera y resistente.
- De material económico y de fácil conservación.
- De material que permita fijar la cubierta (techo).

La estructura puede ser de dos tipos: metálica o de madera.

Metálica, con vigas angulares de 5,08 cm x 10,16 cm (2" x 4") o de tubos redondos, galvanizados, recubiertos de zinc, para evitar la oxidación.

Foto: Julián Mateus-Rodríguez.



Casa de malla con estructura metálica. Corpoica-Tibaitatá, Colombia.

En casas de malla con estructura de tubos es necesario anclar las paredes exteriores al suelo mediante cables de acero galvanizado.

Foto: Byron Potosí.



Anclaje de invernadero con cables de acero galvanizado usado para invernaderos de floricultura, Quito, Ecuador.

De **madera**, con vigas de 10,16 cm x 10,16 cm (4" x 4"), o rollizos (madera cilíndrica de 10 a 15 cm de diámetro).

Foto: Víctor Otazú.



Distribución de las columnas de madera ancladas en el cemento en una casa de malla de 15 x 5 m y techo de policarbonato. CIP-Huancayo, Perú.

Dependiendo de la calidad de la madera y de su tratamiento, las casas de malla con estructura de madera pueden ser de vida útil corta. Están recomendadas para sitios donde abunde la madera y su precio sea económico.

Los elementos de madera que forman la estructura, precisan de ciertos cuidados para prolongar su duración y evitar que se pudran.

Lo mejor es:

- Usar madera tratada y nunca recién cortada.
- A los rollizos hay que quitarles la corteza, de lo contrario duran menos y pueden propagar plagas.
- Se debe quemar la superficie del extremo del rollizo que se mete en los pozos de cimentación, y pintarlo con alquitrán, para impermeabilizarlo y evitar que se pudra.

Respecto de la calidad de la madera:

- Debe estar libre de insectos, hongos, líquenes, etc.
- De preferencia hay que usar rollizos lo más rectos posibles, con pocos nudos.
- Los postes principales deben tener un diámetro superior a 12 cm.
- Los rollizos del techo deben tener un diámetro superior a 10 cm.
- En el techo, la madera serrada debe ser de 10 x 15 cm.
- La unión de vigas se hace con ángulos metálicos de diferentes diseños.



Ángulos metálicos para unión de vigas.

Cubierta o Techo

Puede ser de: vidrio, policarbonato o polietileno.

De vidrio: se usaba para los techos de invernadero porque deja pasar la luz solar e impide la salida del calor. Esta cualidad del vidrio es muy interesante, ya que en invernaderos con techo de vidrio, la pérdida de calor por las noches es menor que la que ocurre en los invernaderos con techos plásticos simples. Actualmente está siendo reemplazado por materiales plásticos avanzados.

De policarbonato: es un material plástico que ha reemplazado al vidrio y en ciertos casos al polietileno por ser más económico. Se utiliza para cubrir los invernaderos, ya que tiene resistencia y durabilidad.

De polietileno (plástico): las láminas de polietileno que se utilizan como cobertura para invernaderos o casas de malla, están formadas por varias capas, generalmente tres. A este tipo de plástico se lo llama también *coextruido*.

En la capa intermedia se combinan aditivos, o sea, sustancias que proporcionan a las láminas diferentes propiedades para mejorar las condiciones ambientales dentro del invernadero, así como la durabilidad y la resistencia del plástico.

Los aditivos más utilizados son:

- **Antigoteo.** Reduce la tensión superficial de las gotas que se condensan durante la noche, evitando el goteo sobre el cultivo, lo que disminuye el riesgo de provocar enfermedades en las plantas.
- **Con filtro UV.** Este tipo de plástico tiene la capacidad de filtrar e incluso bloquear la radiación ultravioleta (UV) del sol. Existen diferentes grados de filtración según la concentración y tipo de aditivos. Los plásticos con filtros que tienen capacidad para bloquear toda la radiación UV alteran el comportamiento de los insectos plaga y transmisores de virus, por lo que se denominan *antivector* o *antivirus*.
- **Antipolvo.** Es una película que en su capa superior tiene baja carga eléctrica y, por lo tanto, no atrae polvo que reduce la entrada de la luz solar al invernadero.
- **Difusión de la luz.** Esta característica hace que la luz se disperse dentro del invernadero de manera uniforme. Es importante para aumentar la eficiencia de la fotosíntesis.
- **Radiación infrarroja .** Permite la entrada de este tipo de radiación y evita que escape aquella que el follaje irradia durante la noche.

¡Importante!

En el caso de cualquier material es importante tener en cuenta su calidad —dado que existen diferentes calidades en el mercado— y sus años de vida útil.

Diseño de la cubierta

La forma de la cubierta influye en la cantidad de luz que entra a la casa de malla. La redonda es la más efectiva. Sin embargo, la más difundida es la cubierta a dos aguas, por su fácil construcción.

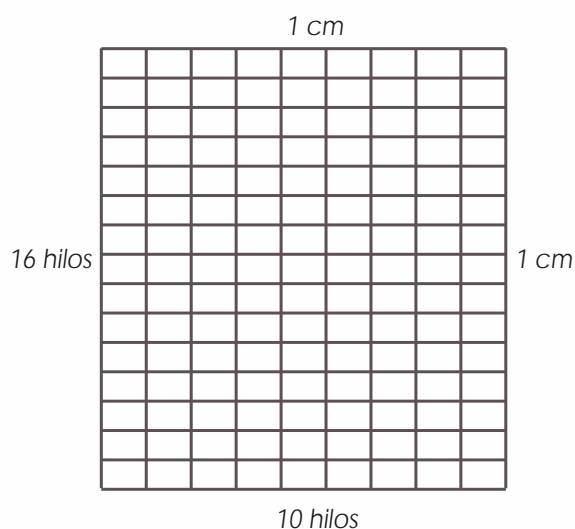
Es importante mantener aberturas en la parte superior del techo (aberturas cenitales) para permitir la salida de aire caliente.



Casas de malla con cubierta redonda y a dos aguas.

Paredes

Las paredes en algunas casas de malla son construidas de ladrillo o bloque, con una altura de 80 cm a 1 m y se las conoce como *antepecho*. Sobre el antepecho se coloca una malla antiáfidos de 16 x 10 hilos por cm^2 , con orificios de 0,4 x 0,8 mm.



Tramado de 1 cm^2 de malla antiáfidos.

La malla antiáfido va apoyada en una estructura de metal o de madera.

Este diseño (antepecho y malla antiáfido) se utiliza en la parte frontal, lateral y posterior de la casa de malla, para aprovechar el viento que ayudará a disminuir la temperatura en días calurosos, además de evitar la entrada de insectos plaga.

Es necesario agregar esponja o un material similar en las uniones del techo y paredes para impedir la entrada de insectos plaga. De igual manera, las aberturas cenitales en el techo deben estar cubiertas con malla antiáfido

Foto: Byron Potosí.



Casa de malla con paredes (antepecho) de 0,8 m de altura y malla antiáfido, CIP-Quito, Ecuador.

Piso

El piso puede ser de tierra, cubierto con grava, *pomina*³⁰ u otro material similar. Esto impide que el calzado del personal entre en contacto directo con la tierra, evitando el polvo. Además, la pomina retiene la humedad luego de ser regada y permite disminuir la temperatura. La desventaja de este tipo de piso es que no se lo puede limpiar.

El piso también puede ser de cemento o concreto, lo cual permite limpiarlo. Sin embargo, su costo es alto.

³⁰ O piedra pómez, muy común en la sierra de Ecuador. Es una roca ígnea volcánica, muy porosa, con baja densidad, de color blanco o gris.

Mecanismos para controlar la temperatura

En el interior de la casa de malla la temperatura puede ser controlada por:

- Cortinas de plástico
- Ventiladores eléctricos
- Extractores eólicos
- Aspersores en el techo
- Malla sombreadora
- Riego y aspersión
- Ducto de ventilación

Cortinas de plástico

En lugares con presencia de heladas, se deben colocar cortinas de plástico para cubrir la malla antiáfidos en los cuatro lados de la casa de malla. Estas cortinas se cierran durante las noches en las que hay riesgo de helada, y se abren durante el día, para permitir la aireación.

Ventiladores eléctricos

Se pueden instalar ventiladores con un diámetro de 60 a 90 cm (24" a 36"), a una altura aproximada de 3 m sobre el nivel del suelo, recubiertos de malla antiáfido y colocados en ambos extremos de la casa de malla (paredes frontal y posterior):

- El ventilador ubicado en la parte frontal absorbe aire del exterior y lo introduce a la casa de malla.
- El ventilador ubicado en la parte posterior absorbe aire del interior de la casa de malla y lo saca al exterior.

De esta manera, los ventiladores ayudan a empujar el aire caliente a lo largo de la casa de malla, bajando la temperatura y humedad sobre el follaje de las plantas.

Extractores eólicos

En casas de malla en las que no se disponga de aberturas cenitales, es posible colocar extractores eólicos para permitir la salida del aire caliente.

Aspersores en el techo

Se pueden colocar aspersores sobre el techo de la casa de malla. Estos se deben encender automáticamente cuando la temperatura interna supere los 25°C.

Foto: Byron Potosi.



Mecanismos de control de temperatura colocados en el techo de la casa de malla de CIP-Quito, Ecuador.

Malla sombreadora

En las etapas iniciales del cultivo de papa en aeroponía (de 15 a 30 días después del trasplante), se requieren temperaturas de entre 15 y 20°C (para evitar la deshidratación de las plántulas) y baja radiación solar (para evitar quemaduras en el follaje).

Una forma efectiva de mantener esta temperatura y disminuir la radiación es colocar una malla negra³¹ sobre la cubierta que proporcione de 40 a 60% de sombra.

Foto: Victor Oiazú.



Malla sombreadora negra (50% de sombra), cubriendo el techo de policarbonato en CIP-Huancayo, Perú.

³¹ También llamada sarán o polisombra.

Otra alternativa es el uso de mallas Chromatinet®. Son mallas de colores que controlan las características del crecimiento vegetativo estimulando la fotosíntesis por medio del manejo del espectro de luz. Por ejemplo, se puede usar una malla azul al 50%, aunque hace falta más investigación para realizar recomendaciones.

Foto: Carlos Chuquilanqui.



Malla sombreadora Chromatinet® azul 50% en CIP-Lima, Perú.

Riego y aspersión

Es posible reducir la temperatura dentro de la casa de malla regando el piso. De igual manera, es posible instalar sistemas automáticos de aspersión que se encienden cuando la temperatura interna supera los 25°C. En este último caso hay que evaluar la necesidad de realizar aplicaciones preventivas de fungicidas de contacto, para evitar daños causados por patógenos que son favorecidos por la alta humedad, como *Phytophthora infestans*.

Ducto de ventilación

Es construido de polietileno transparente con agujeros en toda su extensión y colocado en la parte alta de la casa de malla. Uno de los extremos del ducto se conecta a un ventilador recubierto con malla antiáfido, el cual introduce aire a menor temperatura desde el exterior de la casa de malla. Este ventilador puede ser encendido mediante un sensor de temperatura o de manera manual en las horas de mayor calor.



Ducto de ventilación en CORPOICA-Tibaitatá, Colombia.

Otras instalaciones

Antecámara

La antecámara es una pequeña construcción —con doble puerta— ubicada en la entrada de la casa de malla, cuya función es evitar el ingreso de insectos plaga y proporcionar un espacio para que las personas puedan desinfectar sus zapatos, manos, etc.

En la antecámara se colocan dos recipientes para la limpieza de los zapatos de quienes van a ingresar a la casa de malla (pediluvios). En uno de ellos se coloca una solución de hipoclorito de sodio al 1% (una parte de cloro comercial al 5% en 4 partes de agua)³² sobre una esponja y en el otro se coloca cal. Las personas deben colocar sus zapatos primero en el recipiente con cloro³³, y luego en el recipiente con cal. También debe estar disponible un rociador con alcohol antiséptico (70%) para las manos.

La antecámara puede ser de 2 x 3 m, ya que no se requiere mayor espacio.



Antecámara con recipientes de desinfección de calzado y manos. CIP-Quito, Ecuador.

³² Ver Anexo 3. Ejemplos de cómo preparar soluciones de hipoclorito de sodio o de calcio.

³³ Tener cuidado con la ropa pues el cloro la decolora.

Bodega

La bodega es el lugar donde se guardan los insumos y materiales de producción y donde se seleccionan y almacenan los minitubérculos cosechados, para que puedan verdearse y brotar, bajo condiciones adecuadas de temperatura, humedad y luz difusa.

Es recomendable que la bodega esté junto a la casa de malla y a la casa de máquinas.

Dependiendo de los requerimientos de almacenaje, las bodegas pueden tener distintas dimensiones. Deben contener gabinetes seguros para guardar materiales e insumos, como: fertilizantes, implementos de trabajo, ropa y botas de los operarios y técnicos.

Además deben tener estantes en los que se pueda almacenar la semilla. Si la producción de minitubérculos es alta, se recomienda tener una bodega exclusiva para almacenar la semilla y evitar robos. La bodega debe tener temperatura que permita la brotación adecuada de los tubérculos (entre 12 y 18°C), humedad relativa de 90 a 95%, buena ventilación, luz difusa y aislada con malla antiáfido y protección contra roedores.

Cuarto frío

Si se espera tener altos rendimientos de minitubérculos en cada ciclo de cultivo, es conveniente tener un cuarto frío para almacenarlos por un periodo corto (1 a 2 meses) para después ponerlos a brotar bajo las condiciones requeridas. Los minitubérculos son almacenados a una temperatura de 4 a 5°C, con una humedad de 90 a 95% y sin luz.

Casa de máquinas

Es un lugar cerrado y seguro con piso de cemento y techo opaco donde se instala el equipo de riego: las bombas, los tanques, el temporizador, los filtros, etc.

Este lugar permite mantener la solución nutritiva a una temperatura de alrededor de 15°C. Además, permite aprovechar al máximo el espacio de la casa de malla, ya que todos los equipos se ubican en el interior de la casa de máquinas.



Casa de máquinas adosada a la antecámara y a la casa de malla, CORPOICA-Tibaitatá, Colombia.

En la casa de máquinas también puede estar ubicado el generador eléctrico, aunque se recomienda guardarlo en una construcción especial, alejada de la casa de malla para evitar el ruido y los gases de escape que produce.

Otras dependencias

Es necesario construir otras instalaciones como oficinas, baños y vestidores, para el técnico de implementación y los operarios.

Estas instalaciones deben estar a poca distancia de la casa de malla, para garantizar el monitoreo permanente del cultivo y dar solución inmediata a los problemas que pudieran presentarse.

Mantenimiento

Periódicamente, y en especial antes del inicio del ciclo de cultivo, se deben realizar las siguientes actividades de mantenimiento en la casa de malla:

- Revisar que no existan orificios en la cubierta (goteras) ni en las paredes, malla y puerta por los que puedan ingresar insectos plaga.
- Lavar con agua la parte interna y externa de la cubierta, malla antiáfidos, cortinas y paredes para eliminar el polvo, y desinfectar con una solución de hipoclorito de sodio al 0,25%³⁴.

¡Importante!

Usar SIEMPRE guantes para manipular el hipoclorito de sodio o de calcio.

En el caso de la antecámara, es importante que una vez por semana, se realice una limpieza general con hipoclorito de sodio al 0,25%, que incluya piso, paredes y techo. También es necesario cambiar cada semana, el hipoclorito y la cal de los recipientes para desinfectar el calzado.

En el caso del cuarto frío, es necesario realizar mantenimiento periódico del equipo de enfriamiento, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

³⁴ Ver Anexo 3. Ejemplos de cómo preparar soluciones de hipoclorito de sodio o de calcio.

MÓDULOS DE AEROPONÍA

Son cajones rectangulares en los que se trasplanta el material de siembra (plántulas *in vitro* o esquejes enraizados). Pueden tener una estructura de madera o de metal, sobre la cual va colocada, en todos sus lados, una lámina aislante (conocida como espumaflex, tecnopor, icopor o plastofomo) de 4 o 5 cm de espesor.

Los módulos cumplen la función de aislar las raíces de las plantas de las condiciones ambientales.

La parte interna está recubierta con plástico negro que hace al módulo oscuro e impermeable

Fotos: Miguel Almeida.



Módulos de aeroponía de 5 m de largo recubierto en su interior con plástico negro. CIP-Quito, Ecuador.



Interior del módulo.

Los materiales necesarios para la construcción de los módulos de aeroponía con estructura de madera son:

- Listones de madera de 7 x 4 cm
- Preservante para madera
- Tornillos de 7,62 cm (3")
- Clavos de 7,62 cm (3")
- Pintura para madera (esmalte)
- Láminas de aislante de 4 o 5 cm de espesor, 1 m de ancho y 2 m de largo
- Silicona transparente
- Plástico negro de 0,1524 mm de espesor
- Plástico bicolor (blanco en una cara y negro en la cara contraria) para cubrir la tapa del módulo
- Cinta adhesiva para ductos

- Manguera negra de 1,27 cm (0,5") o 1,91 cm (0,75") de diámetro
- Para realizar los orificios en las láminas de aislante:
 - Lápiz o marcador
 - Regla
 - Tubo galvanizado o varilla metálica de 1,27 o 1,91 cm en forma de cruz; o taladro.
 - Mechero de gas para calentar el tubo
 - Sierra o cuchillo para cortar la manguera
 - Objeto con punta para perforar

¿Cómo se construye un módulo de aeroponía?

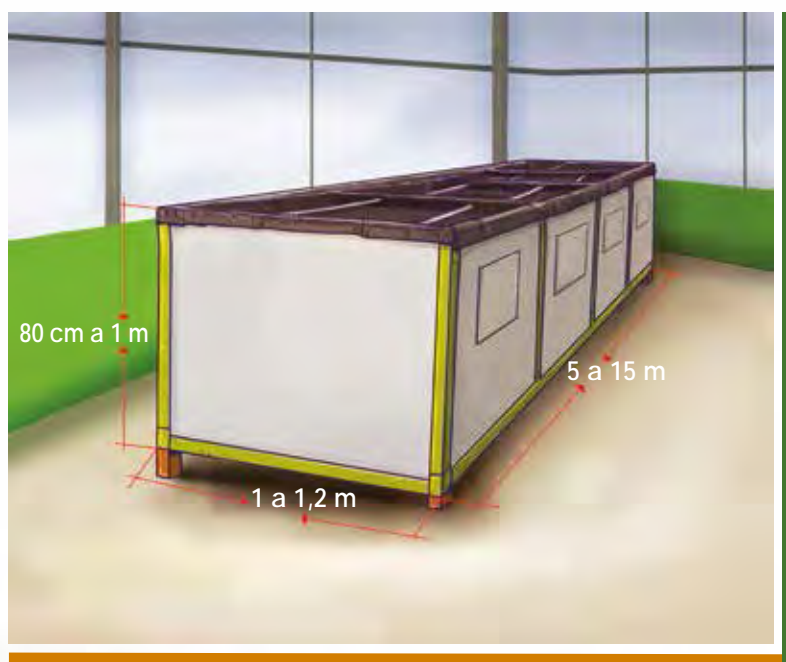
Especificaciones técnicas

Los módulos deben tener las siguientes dimensiones:

Altura: entre 80 cm y 1 m

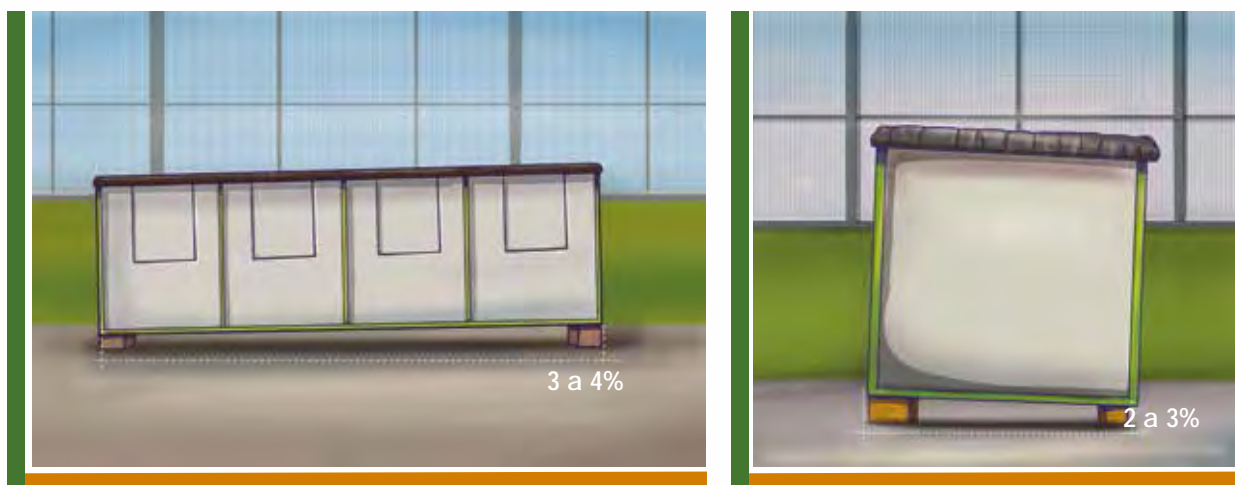
Ancho: entre 1 y 1,2 m

Longitud: varía dependiendo de las dimensiones de la casa de malla. No se recomienda construir módulos de más de 15 m de largo, debido a que a mayor longitud se vuelve difícil su implementación y manejo, porque requieren una mayor inclinación en uno de sus extremos (para drenaje de la solución nutritiva), lo cual dificulta el manejo de la parte aérea de las plantas. Además, si se contamina un módulo es mayor la pérdida de plantas y tubérculos.



Dimensiones de un módulo de aeroponía.

Para permitir el drenaje y retorno de la solución nutritiva al tanque, los módulos deben tener doble inclinación: longitudinal (3 a 4%) y transversal (2 a 3%). Una tubería de 5,08 mm de diámetro debe conectar el extremo más bajo del módulo con el tanque de la solución nutritiva.



Porcentajes de inclinación longitudinal y transversal de un módulo de aeroponía.

Procedimiento para la construcción

El almacén o estructura del módulo puede hacerse de madera o de metal. Para el primer caso, se utilizan listones de madera sujetos con tornillos y clavos.

Para la construcción de los módulos de madera se utiliza madera resistente tanto al peso de las plantas como al deterioro causado por la humedad. Una vez terminada, la estructura de madera debe recibir un tratamiento con preservante para madera, que evite el desarrollo de plagas. Después, deberá ser pintada con esmalte para impermeabilizarla.

Foto: Byron Potosi.



Estructura de madera de un módulo aeropónico. CIP-Quito, Ecuador.

Si la estructura es metálica se utilizan ángulos galvanizados. Este tipo de estructura es más costosa pero proporciona una vida útil mucho más larga debido a que no necesita recibir mantenimiento cada 2 o 3 ciclos, como la estructura de madera, que se deteriora por la humedad.

En la parte superior de la estructura se colocan vigas verticales y transversales cada 1,25 m, que sirven para dar rigidez a la estructura y permitir la colocación de las láminas aislantes. Además, las vigas transversales sirven para sujetar las mangueras de riego. En el piso de la estructura también se colocan vigas transversales cada 62 cm.

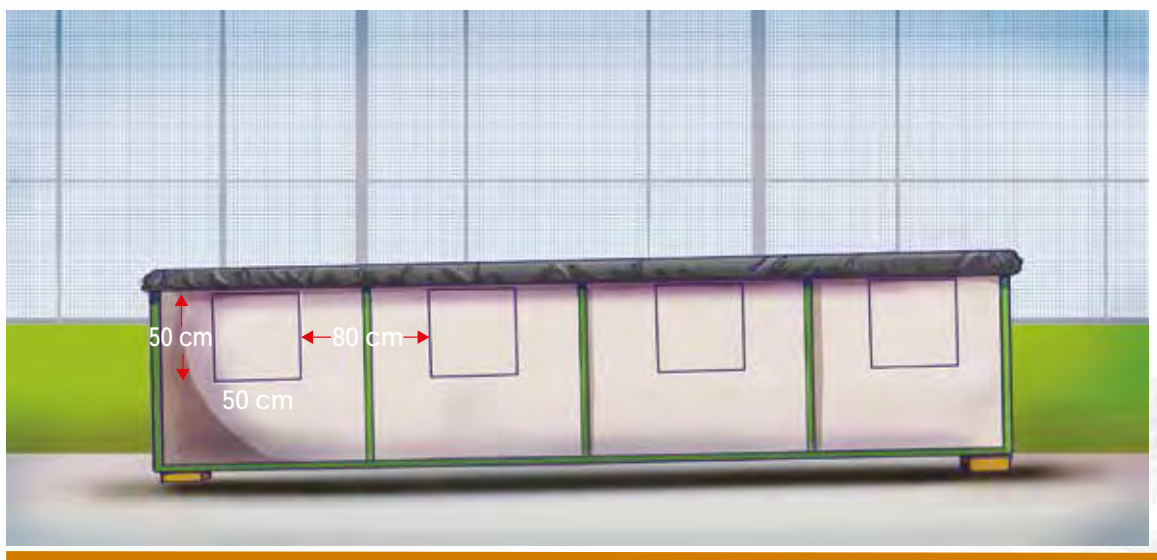
En la estructura del módulo (paredes laterales y piso) se colocan láminas aislantes de manera permanente, utilizando un cuchillo o estilete caliente para cortarlas, y silicona para asegurarlas a la estructura. En el extremo más bajo del piso del módulo es necesario abrir un orificio en la lámina de aislante, para que la solución nutritiva regrese al tanque a través de la tubería de drenaje.

Foto: Byron Potosí.



Colocación de láminas de aislante de 5 cm de espesor en la estructura de madera. CIP-Quito, Ecuador.

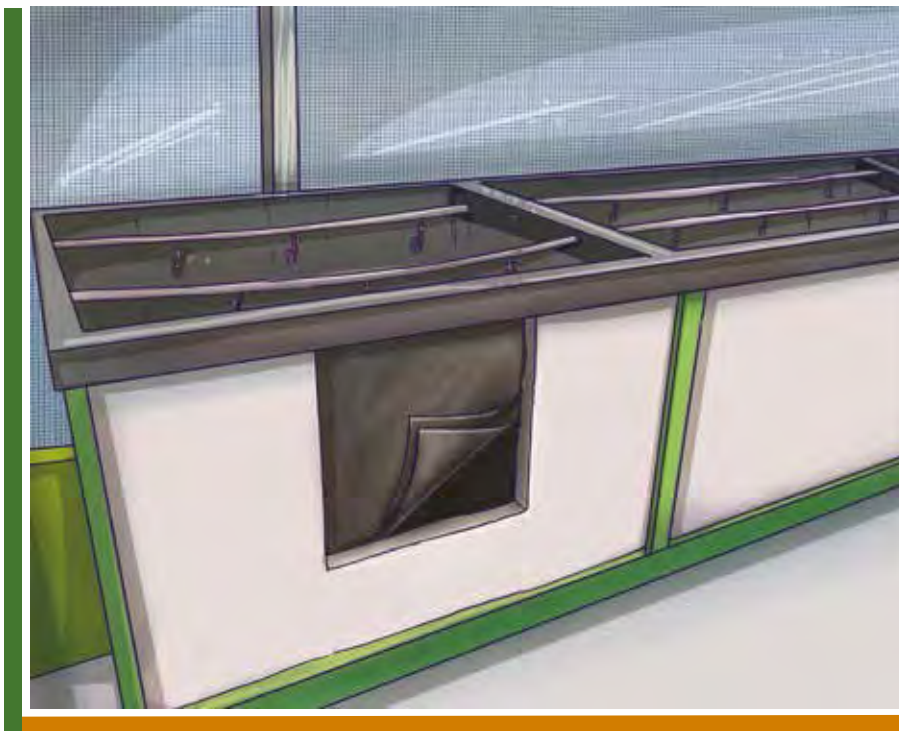
Los módulos deben tener ventanas laterales de 50 x 50 cm ubicadas a 80 cm de distancia entre sí, para permitir la cosecha de los minitubérculos. Estas ventanas se construyen cortando las láminas aislantes a las dimensiones requeridas.



Ventanas laterales para realizar las cosechas en los módulos de aeroponía.

El siguiente paso es cubrir el interior de los módulos con plástico negro de 0,1525 mm de espesor utilizando cinta adhesiva para ductos. La función del plástico es evitar filtraciones de la solución nutritiva y la entrada de luz al sistema radicular. Si hay entrada de luz, los estolones tienden a convertirse en tallos aéreos, disminuyendo el rendimiento de los minitubérculos.

En la parte interna de las ventanas se debe colocar doble cortina del mismo plástico. La cortina interna (de mayor tamaño) evita la salida de la solución nutritiva y la entrada de luz a los módulos.



Doble cortina de plástico en la ventana del módulo de aeroponía.

Foto: Byron Potosí.



Cortina externa de plástico bicolor: lado blanco hacia el exterior de la ventana. CIP-Quito, Ecuador.

En la parte externa de las ventanas se coloca una cortina de plástico bicolor con una tira de madera en el extremo inferior, que se enrolla en el momento de realizar las cosechas. Esta cortina sirve para evitar que entre luz al módulo.

En el piso del módulo es necesario abrir un orificio en el plástico, para permitir el drenaje de la solución nutritiva.

Las tapas superiores de los módulos se construyen con láminas aislantes, con agujeros de entre 1,27 a 1,91 cm (0,5 a 0,75") de diámetro, en los que se introducirán las plántulas.

El procedimiento para realizar los orificios y recubrirlos con manguera es el siguiente:

- Antes de realizar los orificios, tomar en cuenta la distribución de los microaspersores, para asegurar que todas las plantas reciban solución nutritiva.
- Marcar con lápiz o marcador la lámina aislante usando una regla, formando cuadrados para indicar dónde hacer los orificios, que servirán para sujetar las plantas, en función de la densidad requerida.
- Hacer orificios de entre 1,27 a 1,91 cm (0,5" a 0,75") de diámetro en la intersección de las líneas, con el tubo galvanizado en forma de cruz, calentado sobre un mechero. También se puede usar un taladro.

Fotos: Carlos Chuquillanqui.



Uso de tubo galvanizado en forma de cruz. CIP-Lima, Perú.



Uso de taladro. CIP-Lima, Perú.

- Cortar la manguera en secciones de 6 a 7 cm de longitud.
- Introducir la manguera a presión en cada orificio. En estas mangueras se colocarán las plántulas en el momento del trasplante.
- Como alternativa a las mangueras, se puede usar una barra metálica caliente para perforar la lámina aislante y sellar con calor los lados de los orificios.

Las tapas superiores se forran en todas sus caras con un plástico bicolor: el lado blanco se coloca en la parte externa para reflejar la luz y disminuir la temperatura en el interior del módulo, y el lado negro en la parte interna, para lograr oscuridad total dentro del módulo.



Tapa del módulo de aeroponía con orificios recubiertos por manguera donde se trasplantará las plántulas *in vitro* de papa.

Después del aporque-hundimiento (de 30 a 40 días desde el trasplante), entre la tapa y la estructura del módulo, se coloca un faldón de 20 a 40 cm de ancho, de plástico bicolor, con la ayuda de cinta adhesiva para ductos, con el propósito de evitar la entrada de luz.



Foto: Carlos Chuquillanqui.

Faldón de plástico bicolor que evita la entrada de luz en el módulo. CIP-Lima, Perú.

En el caso de que se utilice mallas para el tutorado de las plantas, es necesario instalar tubos metálicos o postes de madera de 5 cm de diámetro, cada 3 m y a cada lado del módulo, para sujetar las mallas de tutorado.



Postes y malla para tutorado. También se observa faldones y cortinas externas en las ventanas para evitar la entrada de luz al interior de los módulos. CIP-Quito, Ecuador.

Mantenimiento

El mantenimiento de los módulos comprende actividades como:

- **Antes del inicio del ciclo de cultivo**, hacer un lavado general de las tuberías utilizando una solución de hipoclorito de sodio al 1%. Esta solución debe circular en el sistema durante 3 días. Después, se realiza un lavado con agua corriente durante otros 3 días. También es necesario desinfectar los módulos —por dentro y por fuera— con solución de hipoclorito de sodio al 1%.
- **Cada semana**, limpiar el polvo que se acumula sobre los módulos con una esponja húmeda con solución de hipoclorito de sodio al 1%.
- **Cada ciclo de cultivo**, cambiar el plástico bicolor que cubre las tapas.
- **Cada 2 ciclos de cultivo**, cambiar el plástico negro que cubre el interior de los módulos y las láminas aislantes de las tapas.
- **Cada 3 ciclos de cultivo**, realizar un mantenimiento de la madera aplicando preservante y pintura de esmalte, para evitar daños por humedad.

- **Cada 4 o 5 ciclos de cultivo**, cambiar las láminas de aislante de las paredes laterales y del piso de los módulos.

SISTEMA DE RIEGO

Está formado por varios componentes:

- Bombas
- Sistema de microaspersión
- Sistema de filtrado
- Sistema de control
- Generador eléctrico de emergencia

Dependiendo de la disponibilidad de recursos, se recomienda tener al menos dos sistemas de riego independientes en cada casa de malla. De esta manera se reduce el riesgo de pérdida total por efecto de patógenos, que pueden ingresar al sistema de riego, o por intoxicación, debido a fallas en la preparación de la solución nutritiva.

No es rentable tener sistemas de riego independientes para cada módulo, debido al alto costo de implementación. Este tipo de sistemas independientes se los usa para investigación, porque permite probar diferentes tratamientos (por ejemplo, diferentes densidades de siembra, soluciones nutritivas, variedades, etc.).

Para un módulo de 5 a 10 m de longitud, se necesitan los siguientes materiales, aclarando que pueden ser adaptados a las condiciones propias de cada lugar:

Bomba y accesorios

- Bomba centrífuga de 0,5 o 0,75 HP
- Tanque hidroneumático³⁵
- Interruptor de presión (presostato)
- Manómetro
- Válvula uniflujo (check) de 2,54 cm (1")
- Válvula de aire de 2,54 cm
- Llave de paso de 2,54 cm
- Filtro de disco de 2,54 cm con salida y entrada tipo macho
- Válvula eléctrica con solenoide

³⁵ Se pueden usar bombas sumergibles, en cuyo caso no se necesita tanque hidroneumático.

Sistema de microaspersión y gasfitería:

- Microaspersores con boquilla de 1,1 mm de diámetro (caudal: 61 litros por hora)
- Tanque plástico de 500 a 1000 litros
- Tubos PVC de 2,54 cm (1")
- Válvula de pie de 2,54 cm
- Uniones codos PVC de 2,54 cm
- Niplos de 2,54 cm
- Uniones universales de 2,54 cm
- Manguera de riego de 16 mm
- Uniones de manguera de 16 mm
- Tubería PVC para drenaje de 5,08 cm (2")
- Cinta teflón

Sistema de filtrado

- Filtro microbiológico (filtro de carbón activado y lámpara UV)

Sistema de control

- Tablero de control de bombas
- Temporizador (timer)
- Cable eléctrico número 12

Generador eléctrico de emergencia y accesorios

- Generador eléctrico portátil o estacionario
- Tablero de transferencia manual o automático
- Interruptor de circuito automático (braker)
- Equipo eléctrico accesorio

Instalación de los tanques, bombas y tuberías

El tanque de la solución nutritiva, la bomba hidroneumática, el tablero de control de bombas, el temporizador y los filtros microbiológicos se ubican en la casa de máquinas.



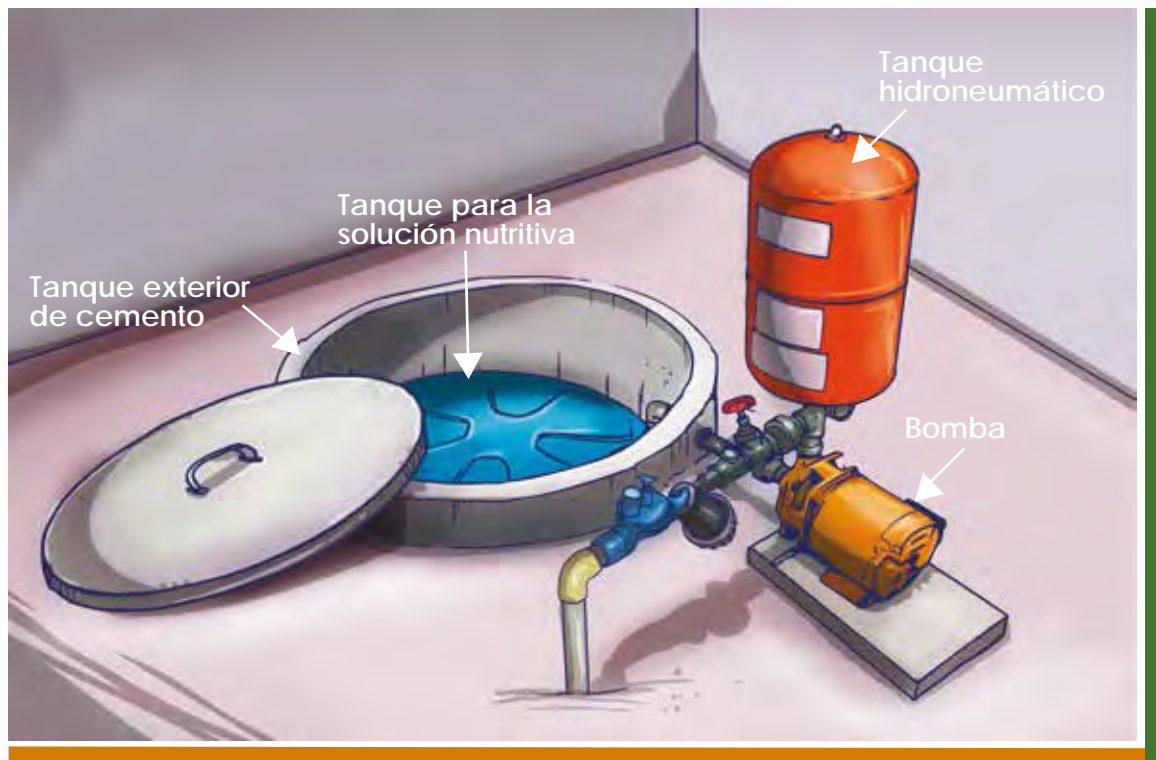
Esquema simplificado de un sistema de aeroponía en papa.

El tanque está ubicado bajo el nivel del suelo para recibir por gravedad la solución nutritiva procedente de los módulos después de cada riego. Está recubierto por un tanque exterior de cemento que impide el contacto con la tierra, reduciendo el peligro de contaminación y manteniendo una temperatura adecuada de la solución nutritiva (15°C).

La capacidad del tanque dependerá del tamaño de los módulos. Un tanque de 500 litros es adecuado para un área de producción efectiva de 20 m² (área del módulo).

El tanque de la solución nutritiva y el tanque exterior de cemento deben permanecer cerrados para evitar la contaminación.

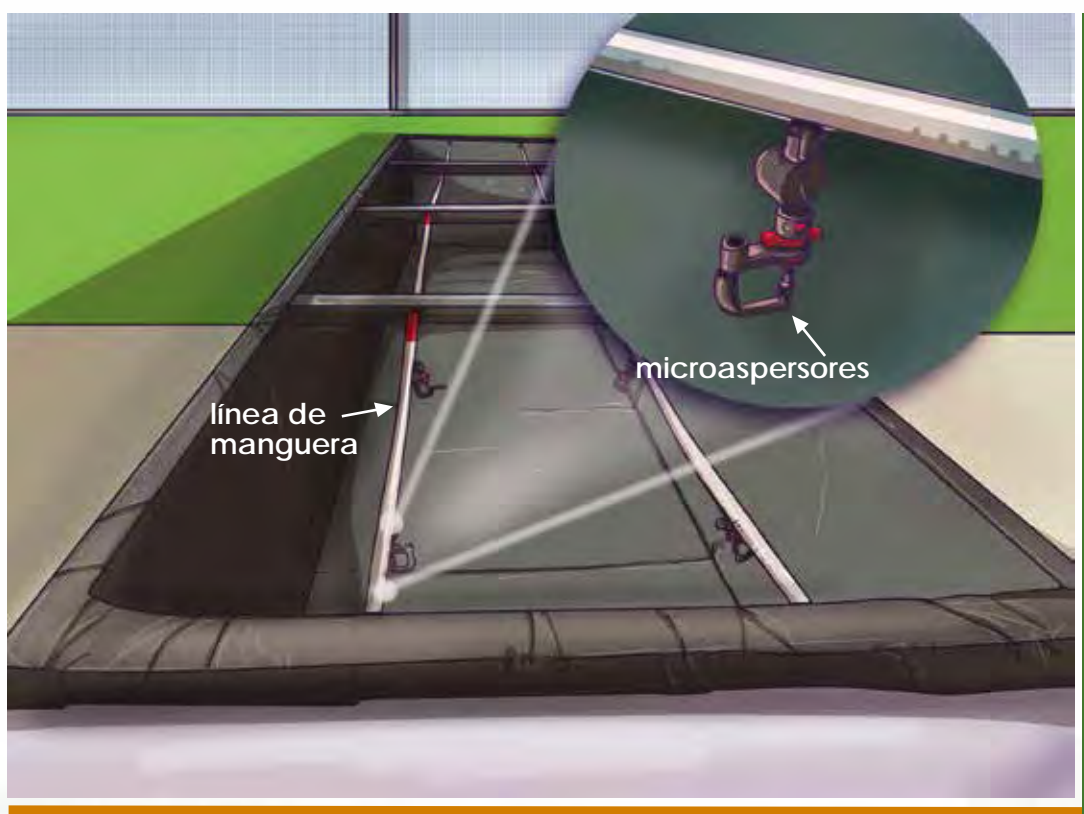
La bomba está conectada con el tanque a través de una tubería que tiene en su parte inicial una válvula de pie. Junto a la bomba se instalan accesorios como tanque hidroneumático, interruptor de presión, manómetro, válvula uniflujo, válvula de aire, llave de paso, filtro de disco y válvula eléctrica con solenoide.



Tanque de solución nutritiva y bomba con accesorios.

Colocación de los microaspersores

En la parte central superior de los módulos, deben colocarse dos líneas de manguera negra de 16 mm de diámetro con una separación de 30 cm entre sí, en las cuales se colocarán los microaspersores a 60 cm de distancia uno de otro. Las mangueras van apoyadas en las vigas transversales de los módulos.



Mangueras y microaspersores utilizados en los módulos aeropónicos.

Generador eléctrico de emergencia

En casos de cortes del flujo eléctrico se debe contar con un generador eléctrico todo el tiempo. Este generador puede ser portátil o estacionario y preferiblemente, debiera ser de transferencia automática, es decir que se encienda en caso de un corte de electricidad. La capacidad del generador eléctrico depende del número de bombas del sistema de riego.

¡Importante!

Una bomba y otros **equipos de repuesto**, como interruptor de presión, microaspersores, válvula eléctrica y piezas de gasfitería, son críticos para el funcionamiento del sistema de riego y deben estar siempre disponibles. Además, el técnico de implementación y al menos un operario deben estar capacitados para reemplazarlos en caso que se dañen.

Mantenimiento del sistema de riego

El sistema de riego se debe monitorear continuamente para asegurar su normal funcionamiento. Para ello es necesario:

- Desinfectar el tanque de la solución con hipoclorito al 1% cada vez que se renueve la solución nutritiva.
- Revisar diariamente que no existan fugas en las tuberías, ya que producen bajas de presión en los microaspersores y, por consiguiente, una distribución desigual de la solución nutritiva a las raíces. Además ocasionan daños mecánicos en las bombas. Si se presenta una fuga se debe desarmar esa parte de la tubería, reemplazar las piezas de gasfitería y ajustar bien todas sus partes.
- Al mismo tiempo que se revisan las tuberías, revisar el funcionamiento de los microaspersores para limpiarlos o reemplazarlos de ser necesario.
- Realizar lavados semanales de los filtros de anillo. Esta práctica evita el taponamiento de los microaspersores. En el caso de los filtros microbiológicos, seguir las recomendaciones del fabricante para su mantenimiento.
- Monitorear los rangos de presión a los que deben funcionar las bombas: entre 20 y 40 psi o entre 15 y 35 psi³⁶. Estos rangos de presión dependen del tiempo de uso de la bomba: cuando la bomba es nueva se alcanza el primer rango y cuando la bomba

³⁶ psi: libra-fuerza por pulgada cuadrada (pounds-force per square inch). 1 psi = 6,895 kPa

tiene uno o más ciclos de uso, trabaja dentro del segundo rango para garantizar un riego uniforme a las raíces. Si la presión no está en los rangos ideales, hay que instalar la bomba de repuesto y llevar la bomba dañada a mantenimiento. Usualmente, cuando la bomba presenta bajas de presión, se debe cambiar el sello mecánico que se desgasta por el uso.

- Realizar el mantenimiento del generador de emergencia, de las bombas y de otros equipos del sistema de riego siguiendo las recomendaciones del fabricante; después de cada ciclo de cultivo se debe hacer un mantenimiento a fondo.

Manejo de desechos

Cada cierto número de ciclos de cultivo se deben reemplazar los materiales no degradables, como plástico (cada dos ciclos de cultivo) y láminas aislantes (cada 4 o 5 ciclos de cultivo). Estos residuos deben ser manejados siguiendo las regulaciones dispuestas por la legislación local.

Idealmente, estos residuos se pueden usar con otros propósitos. Por ejemplo, el plástico de los módulos sirve para construir barreras plásticas para manejo de *Premnotrypes vorax*; en tanto que las láminas de aislante son útiles en cuartos fríos, para construir corrales para animales menores, etc.

EXPERIENCIAS Y APRENDIZAJES EN LA CONSTRUCCION DE INFRAESTRUCTURA

¿Qué nos dice la experiencia?

EN ECUADOR

Sobre sistemas de riego independiente

En el primer ciclo de aeroponía se construyeron:

- Cuatro módulos de 15 m de largo x 1 m de ancho.
- Un solo sistema de riego para los cuatro módulos.
- Cada módulo tenía una manguera de riego en la parte superior central.

A partir del segundo ciclo se construyeron:

- Ocho módulos más pequeños (5 x 1 m).
- Sistemas de riego independientes para cada módulo (8 en total).
- En cada módulo se instaló una doble línea de manguera en la parte superior.

Aprendizaje: Disponer de sistemas de riego independientes para cada módulo de aeroponía, permite evaluar y determinar los mejores tratamientos para cultivar papa mediante esta técnica. Por ejemplo, se probaron diferentes soluciones nutritivas³⁷ y rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal³⁸. Además, con la doble manguera de aspersión, se uniformizó la distribución de la solución nutritiva en las raíces y por consiguiente el crecimiento de las plantas en cada módulo.

Sobre las características de la casa de malla

Para el control de la temperatura interna se hicieron algunas adecuaciones a la casa de malla, ya que originalmente se construyó con otros propósitos:

- Se pintó el techo de vidrio de color blanco, pero esto redujo notablemente la entrada de luz. En su lugar se colocó una malla sombreadora sobre el techo, que sólo se usa en los momentos de altas temperaturas.
- Se colocaron 2 ventiladores en los extremos de la casa de malla para extraer el aire caliente.
- Se colocaron 4 extractores eólicos en la parte superior del techo.

Aprendizaje: Es necesario construir una casa de malla que cumpla con todas las especificaciones técnicas para realizar aeroponía; de lo contrario hay que prever los posibles inconvenientes que se puedan presentar.

³⁷ Cayambe, 2010.

³⁸ Potosí, 2012.

Sobre el tanque para la solución nutritiva

En los tres primeros ciclos de cultivo, el tanque de la solución nutritiva estaba en contacto con el suelo de la casa de malla. Esto hacía que la solución nutritiva se calentara (>15°C) y además se expusiera al polvo, porque la tapa no era adecuada. En el cuarto ciclo se construyó un tanque con revestimiento de cemento y se mejoró el diseño de la tapa.

Aprendizaje: El tanque de cemento sirve de protección al tanque plástico que contiene la solución nutritiva. Evita la entrada de polvo y mantiene la solución nutritiva a una temperatura adecuada (15°C).

Sobre la necesidad de un generador eléctrico

En los tres primeros ciclos de producción no se contó con un generador eléctrico de emergencia. Por lo tanto, cuando se presentaron cortes de fluido eléctrico, se corrió el riesgo de perder toda la producción.

A partir del cuarto ciclo se compró un generador eléctrico portátil y en el quinto ciclo se instaló un generador eléctrico estacionario que abastece a toda la estación experimental.

Aprendizaje: Para implementar aeroponía es imprescindible contar con un generador eléctrico portátil o estacionario.

EN PERÚ

Sobre uso de cobertores

En la estación experimental del CIP-Lima, inicialmente se usó un cobertor con malla antiáfido en las paredes y techo. Sin embargo, en días con garúa se presentó goteo de agua con tierra sobre las plantas, lo que produjo enfermedades foliares. Luego se adaptó una casa de malla con techo de fibra de vidrio y paredes laterales cubiertas con malla antiáfido.

Aprendizaje: Para producir semilla de calidad mediante aeroponía se requiere necesariamente una construcción con cubierta rígida, para proteger el cultivo de factores abióticos adversos.

Sobre el sistema de enfriamiento de la solución nutritiva

En zonas o épocas de clima cálido (como en Lima entre diciembre y abril), la temperatura de la solución nutritiva puede sobrepasar los 30°C, lo que causa estrés a las plantas e interfiere en la tuberización.

Para solucionar esta situación, se instaló un sistema de enfriamiento para la solución nutritiva, mediante un serpentín por el que circula gas frío conectado a una unidad de enfriamiento y a una unidad de control de temperatura. Esto permite mantener la temperatura alrededor de 15°C, óptima para la producción de tubérculos de papa.

Aprendizaje: En aeroponía hay tres temperaturas importantes: la de la casa de malla (día: entre 18 y 25°C; noche: entre 8 y 15°C) la de la solución nutritiva (alrededor de 15°C) y la del módulo aeropónico (entre 15 y 16°C). Si se instala un sistema de aeroponía en zonas de clima cálido, es necesario instalar un sistema de enfriamiento de la solución nutritiva, lo que incrementa los costos de infraestructura y mantenimiento y añade un nivel más de complejidad al sistema aeropónico. Esto indica la importancia de elegir bien el sitio para ubicar la casa de malla.

Fotos: Carlos Chuquillanqui.



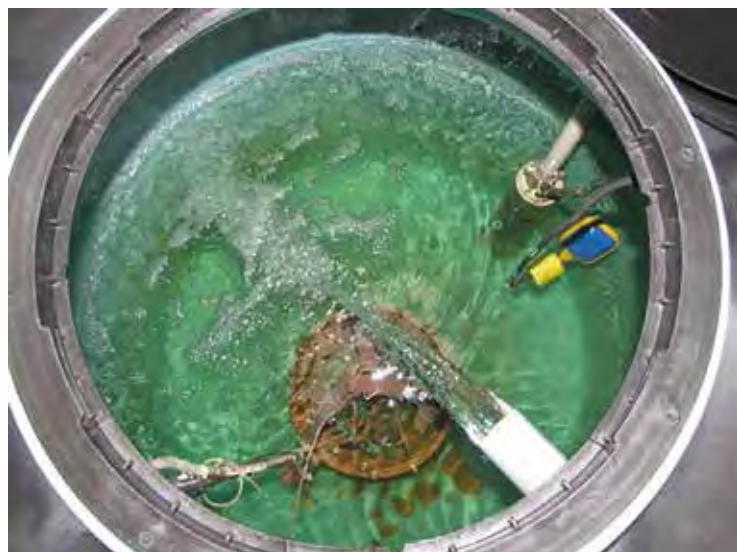
Unidad de enfriamiento (condensador y compresor).



Unidad de control de temperatura.



Serpentin de cobre con sensor de temperatura.



Serpentin dentro del tanque de la solución nutritiva.

EN COLOMBIA

Sobre uso de cortinas de plástico

La casa de malla está ubicada cerca de vías secundarias y con el paso de vehículos se produce bastante polvo, que entra en contacto con las plantas. Para evitar esta situación se colocaron cortinas plásticas en las paredes laterales.

Aprendizaje: La utilización de cortinas de plástico evita la entrada de polvo. Sin embargo, es necesario abrirlas al medio día para evitar que la temperatura suba. Esto pone nuevamente en evidencia la importancia de elegir bien el sitio para ubicar la casa de malla.

La infraestructura de aeroponía usada en Colombia por CORPOICA, en Ecuador por INIAP y CIP, y en Perú por CIP, se encuentra descrita en el Anexo 4.

En pocas palabras...

La infraestructura es uno de los factores más importantes para tener éxito en la implementación del sistema aeropónico, por lo que se deben tener muy en cuenta las especificaciones técnicas previas a su construcción.

Los principales aspectos a tener en cuenta son:

Selección del sitio. El lugar donde se va a construir el invernadero debe estar ubicado entre 2600 y 3500 msnm, con una temperatura promedio diaria de entre 18 y 25°C durante el día y de entre 8 y 15°C durante la noche. Debe disponer de suministro permanente de energía eléctrica, agua de riego de calidad y vías en buen estado para facilitar el acceso al invernadero. Así mismo, debe estar cerca de zonas habitadas, tener protección contra vientos fuertes y estar alejado de otros cultivos de papa comercial.

Recursos humanos. Para la implementación de un invernadero para aeroponía se requiere de personal capacitado en áreas específicas de la construcción, entre ellos: obreros o empresas especializadas en construcción de invernaderos y en instalación de sistemas de riego. Todo este personal estará siempre supervisado por el técnico de implementación.

Casa de malla. Es una construcción relativamente sencilla, integrada por una estructura de soporte, cubierta y con paredes de malla antiáfido. La estructura puede ser de madera o metal, con cubierta redonda o a dos aguas, que puede ser de vidrio, policarbonato o polietileno.

En la casa de malla, los mecanismos de control de temperatura más comunes son: cortinas de plástico, ventiladores eléctricos, extractores eólicos, aspersores en el techo, malla sombreadora y riego del piso.

Otras instalaciones que forman parte de la infraestructura son: la antecámara, la bodega, el cuarto frío, la casa de máquinas y las dependencias administrativas.

Módulos de aeroponía. Son cajones rectangulares con estructura de madera o metal, recubiertos en todos sus lados con una lámina aislante e internamente con plástico negro, en los cuales crecen y tuberizan las plantas.

Sistema de Riego. A través del sistema de riego se suministra la solución nutritiva nebulizada a las raíces de las plantas, utilizando microaspersores.

