

Módulo Antártico de Producción Hidropónica: primeros resultados del cultivo en la Antártida Argentina

Antarctic Hydroponic Production module: first results of cultivation in Argentine Antarctica

Jorge Alberto BIRGI, jorgebirgi@gmail.com; Verónica GARGAGLIONE, verogargaglione@gmail.com; Pablo Luis Peri, peri.pablo@inta.gob.ar; Cesar Ismael ARAUJO PRADO, cesar.i.araujo.p@hotmail.com; Boris Gaston DÍAZ, diaz.boris@inta.gob.ar; Leonardo GONZALEZ, lgonzalez@uarg.unpa.edu.ar; Esteban GESTO, egesto@uarg.unpa.edu.ar; Karim HALLAR, karim.hallar.rg@gmail.com; Daniel LAGUÍA, dalaguia@hotmail.com; Osiris SOFÍA, sistemasuarg@gmail.com; Martin DÍAZ, biomartindiaz@gmail.com

Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Río Gallegos
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Santa Cruz
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CIT Santa Cruz
Comando Conjunto Antártico - Dirección Nacional del Antártico

Recibido: 14/04/23 Aceptado: 13/06/2023

RESUMEN

Una forma de producir alimentos frescos de manera eficiente e intensiva en ambientes extremos es mediante técnicas hidropónicas. Éstas han sido ampliamente utilizadas en el mundo, sobre todo desde la década de 1960 hasta el presente. Asimismo, para obtener alimentos frescos en lugares con condiciones ambientales desfavorables los sistemas hidropónicos se complementan con tecnología de producción “Indoor”, que consiste en crear ambientes que proveen de manera artificial las condiciones necesarias para el crecimiento de las plantas, principalmente luz y temperatura apropiadas. La República Argentina sostiene su presencia en la Antártida desde el año 1904. Tal logro ha requerido de grandes esfuerzos logísticos, entre los cuales se destaca, por su complejidad, el abastecimiento de alimentos. La alternativa habitual para la provisión de alimentos a las Bases Antárticas Conjuntas (BAC) de Argentina es la utilización, por períodos largos de tiempo, de raciones deshidratadas, enlatadas en conserva o super congeladas. Esta alternativa impacta negativamente en la calidad nutricional y organoléptica de los alimentos y, en consecuencia, en la calidad de vida de las personas, en especial de aquellas con estadías prolongadas como las dotaciones permanentes (personal que reside un año o más en las Bases). El objetivo del presente proyecto denominado “Módulo Antártico de Producción Hidropónica” (MAPHI) fue el de diseñar e instalar un módulo de producción capaz de proveer verduras frescas para abastecer las bases antárticas argentinas, a fin de mejorar la alimentación del personal de dotación a través de la producción de alimentos frescos. El sistema MAPHI se basa en 4 pilares fundamentales: (i) un módulo productivo semiautomatizado, (ii) un programa de capacitación y apoyo remoto permanente para nuevas dotaciones, (iii) un panel de control remoto de datos críticos del sistema para asegurar seguimiento y construir una base de datos a través de tecnología Big Data e IoT (Internet of Things) necesaria para la generación continua de información orientada a la mejora del desarrollo y sus procesos, y (iv) una web informativa para comunicar estados y avances del proyecto, vínculo con la sociedad en temas relacionados a la producción de alimentos en el continente antártico. Para lograr el objetivo, se acondicionó



un contenedor marítimo de 20 pies, y en su interior se instalaron dos sectores de producción con tres niveles cada uno. En cada nivel de producción se emplazaron 12 cajones de 10 litros con 4 perforaciones cada uno, que permiten el anclaje de 4 plantas por cajón, para obtener 240 plantas adultas por tanda. Cada sector de producción cuenta con un sistema de luces SAP (sodio de alta presión) que proveen la cantidad de luz necesaria en un ciclo de 8 horas de luz y 8 hs de oscuridad, encendiéndose intermitentemente en cada sector. Asimismo, el contenedor se calefacciona con un panel de bajo consumo de 620 W, que, sumado al calor que emiten las lámparas, le provee al lugar de producción una temperatura promedio de 26 °C. Las primeras plantas fueron sembradas el 17 de mayo de 2022 y se trasplantaron el 30 de junio al sistema de cajones hidropónicos. Las especies cultivadas en esta primera instancia fueron rúcula (*Erucavesicariasp. Sativa*) y lechuga (*Lactuca sativa*) variedad Grand Rapid. La primera cosecha se realizó el 16 de julio, obteniendo un total de 15,6 kg de lechuga (144 plantas) y 4,4 kg d rúcula (96 plantas), logrando todo el ciclo de cultivo en un lapso de 30 días. Consideramos que el presente trabajo es innovador ya que permite obtener cultivos frescos en un lugar extremo como es el continente Antártico, es factible de ser monitoreado a distancia mediante el uso de tecnología IoT y a su vez, y quizás lo más importante, contribuye a la soberanía alimentaria de la dotación invernante, al permitir mejorar la calidad de la alimentación de las personas que deben permanecer en las bases antárticas argentinas por largos períodos de tiempo.

Palabras Claves: Cultivos Indoor, Hortalizas, Tecnología IoT

ABSTRACT

One way to efficiently and intensively produce fresh food in extreme environments is through hydroponic techniques which have been widely used in the world, especially from the 1960s to the present. Likewise, to obtain fresh food in places with unfavorable environmental conditions, hydroponic systems are complemented by "Indoor" production technology, which consists of creating environments that artificially provide the necessary conditions for plant growth, mainly appropriate light and temperature. Argentine maintains its presence in Antarctica since 1904. This has required great logistical efforts, among which, due to its complexity, food supply stands out. This impacts negatively on nutritional and organoleptic quality of food and, consequently, on people's quality of life, especially those with prolonged stays such as permanent staff. The usual alternative for food provision in the Joint Antarctic Bases (BAC) of Argentina is the use, for long periods of time, of dehydrated, canned, preserved or super-frozen rations. The aim of this project called "Antarctic Hydroponic Production Module" was to install a production module capable of providing fresh vegetables to supply the Argentine Antarctic bases, in order to improve the nutrition of the staff. The system is based on 4 fundamental pillars: (i) a semi-automated production module, (ii) a training program and permanent remote support for new crews, (iii) a remote control panel for critical system data to ensure monitoring and build a database through Big Data and IoT (Internet of Things) technology necessary for the continuous generation of information aimed at improving development and its processes, and (iv) an informative website to communicate status and progress of the project, link with society on issues related to food production in the Antarctic continent. To achieve the objective, a 20-foot shipping container was conditioned, and two production sectors with three levels each were installed inside. At each production level, 12 10-liter boxes with 4 perforations each were placed, which allow the anchoring of 4 plants per box, to obtain 240 adult plants per batch. Each production sector has a SAP (high

pressure sodium) lighting system that provides the necessary light in cycles of 8 hours of light and darkness, turning on intermittently in each sector. Likewise, the container is heated with a low-consumption 620 W panel, which, added to the heat emitted by the lamps, provides a main temperature of 26 °C. Plants were sown on May 17, 2022 and transplanted on June 30 to the hydroponic box system. The species cultivated were arugula (*Erucavesicaria* sp. Sativa) and lettuce (*Lactuca sativa*) variety Grand Rapid. Harvest was carried out on June 16, obtaining a total of 15.6 kg of lettuce (144 plants) and 4.4 kg of arugula (96 plants), achieving the entire crop cycle in a period of 30 days. We believe that this work is innovative since allows to obtain fresh crops in an extreme place such as the Antarctic continent, it is feasible to be remotely monitored through the use of IoT technology and the most importantly, contributes to sovereignty of the winter crew, by allowing to improve the quality of the diet of the people who must remain in the Argentine Antarctic bases for long periods of time.

Key words: Indoor production, Vegetables, IoT technology

INTRODUCCIÓN

La República Argentina mantiene personal en la Antártida de forma ininterrumpida desde el año 1904, siendo el primer país que tuvo presencia humana permanente en este continente a partir de la puesta en funcionamiento de un observatorio meteorológico y una pequeña oficina postal (Fontana, 2018). Esto requiere sin dudas de un gran esfuerzo de orden logístico que incluye, entre otros aspectos, el abastecimiento de alimentos e insumos al personal que habita y trabaja en las distintas bases de continente antártico argentino. En este sentido, uno de los aspectos fundamentales a atender es la alimentación del personal, la cual se caracteriza por utilizar casi exclusivamente productos congelados y conservas para la elaboración de las comidas. Esto da como resultado una ingesta de verdura fresca por largos períodos de tiempo, especialmente en los meses de otoño e invierno, cuando el transporte aéreo y marítimo disminuye abruptamente al verse limitado por el clima.

La ingesta de alimentos frescos presenta ventajas nutricionales por sobre los conservados, ya que éstos presentan un alto contenido de sodio y aditivos químicos, utilizados para aumentar la estabilidad o capacidad de conservación, incrementar la aceptabilidad, permitir una elaboración a gran escala, así como asegurar una calidad constante en función del tiempo (Baena Ruiz y Torijalsasa, 2001). Es importante destacar que una parte considerable del personal que trabaja en las bases Antárticas permanece un año completo en la base, con lo cual, la inclusión de alimentos frescos en la dieta permitiría mejorar su nutrición, haciéndola más saludable, placentera y variada, al agregar diversas verduras frescas, a la vez que se reducen los efectos nocivos de los alimentos conservados que pueden impactar negativamente en la salud de las personas cuando son ingeridos por largos períodos de tiempo (Roncancio et al., 2015). Asimismo, existen evidencias de los beneficios psicológicos que conlleva la producción de plantas en el personal que habita en el continente antártico (Pathak et al, 1994; Haeuplik-Meusburger, 2013), ya que el hecho de estar en contacto con plantas en un ambiente cálido, armónico y verde, puede retribuir en aspectos positivos y de distracción para personal que pasa mucho tiempo encerrado debido al clima hostil durante la mayor parte del año (Ulrich y Parson, 1992; Parson et al., 1994). En este contexto, a partir del año 2015, investigadores de la EEA INTA Santa Cruz, Universidad Nacional de la Patagonia

Austral, personal del Comando Conjunto Antártico y la Dirección Nacional del Antártico, comenzaron a delinear las pautas para lograr la producción continua de verduras frescas en la Antártida Argentina, mediante la implementación del proyecto MAPHI: Módulo Antártico de Producción Hidropónica, el cual tiene como objetivo lograr cultivos frescos in situ a partir de emplear tecnología hidropónica Indoor.

Las primeras experiencias de producción de cultivos en la Antártida datan del año 1902 (Bamsey et al., 2015) y desde ese entonces se han informado al menos 46 emprendimientos de producción de cultivos llevados adelante por 13 países, tanto en invernaderos como en contenedores marítimos adaptados (Bamsey et al., 2015). Muchas de estas experiencias fueron realizadas con suelo traído desde el continente, mientras que otras ya utilizaban tecnología hidropónica. En octubre de 1991, se creó el Tratado Antártico, que incluye el protocolo de protección ambiental de la Antártida (Protocolo de Madrid), el cual provee un amplio rango de protección para evitar la invasión de especies exóticas prohibiendo el cultivo con suelo exógeno. Este protocolo entró en vigencia a partir de 1998 y, en ese momento, muchas de las producciones que se llevaban adelante tuvieron que ser desmanteladas y erradicadas del continente antártico. Desde ese entonces, solo 9 países llevan adelante la producción de cultivos cumpliendo los recaudos y permisos que exige el Tratado Antártico, la mayoría son a escala experimental y siendo la tecnología hidropónica la mayormente utilizada (Bamsey et al., 2015). En cuanto a la Antártida Argentina, previo a la instalación del presente proyecto no existían antecedentes de producción de verduras frescas de ningún tipo.

La tecnología Indoor se ha mostrado efectiva para la producción hortícola en ambientes extremos y consiste en cultivar en ambientes artificiales donde las plantas son provistas de todos los recursos necesarios para sobrevivir: luz, agua, temperatura y nutrientes. La técnica de hidroponía, por su parte, se trata de producir cultivos en medio acuoso (solución nutritiva), sin suelo, y su importancia reside en lograr una alta productividad por metro cuadrado, menor incidencia de enfermedades (muchas de las cuales se propagan en el suelo), su gran eficiencia en el uso de agua y la multiplicidad de cultivos compatibles con la técnica. Diversas especies hortícolas son aptas para el cultivo en hidroponía. Sin embargo, para una propuesta en un ambiente tan sensible como el antártico, las especies a cultivar deben ser cuidadosamente seleccionadas según sus aptitudes y características. En este sentido, para el presente proyecto se tuvo en cuenta que posean una adaptación al frío baja o moderada, a fin de extremar las precauciones en la propagación de especies exóticas en caso de una eventual diseminación accidental de semillas.

El presente trabajo tiene como objetivo exponer la descripción del módulo y los primeros resultados productivos del cultivo de verduras con tecnología Indoor en territorio de la Antártida Argentina, logrados a partir del proyecto MAPHI. El fin último del proyecto es mejorar la calidad nutricional de la alimentación del personal de la Base Marambio mediante la incorporación en la dieta de verduras frescas cultivadas in situ.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

El trabajo se realizó en la Base Marambio de la Antártida Argentina (64°14'LS; 56°38'LO) operada por el Comando Conjunto Antártico, dependiente del Ministerio de Defensa. En este



lugar las temperaturas promedio de verano oscilan entre los $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y las de invierno entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, con velocidades del viento que superan regularmente los 125 km/h y sensaciones térmicas de hasta $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. El sistema de producción fue emplazado en la sección oeste de la Base, en un contenedor marítimo dry cargo de 20 pies de largo (6 m) pre-existente, el cual fue revestido con una triple capa aislante térmica y acústica de lana de roca con barrera de vapor, necesaria para amortiguar los efectos del viento y del frío extremos.

Descripción del Módulo de Producción

El sistema de producción elegido es hidropónico, mediante cajones de producción todos interconectados entre sí con una entrada de solución y un drenaje de salida.

El módulo cuenta con dos sectores de producción, con tres niveles en cada uno (Figura 1). Los niveles fueron armados con paneles de aluminio nervado de 6 m de largo por 0,6 m de ancho. En cada nivel de producción se emplazaron 12 cajones (40 x 30 x 12 cm) de 10 litros de capacidad individual, con 4 perforaciones en superficie cada uno, que permiten el anclaje de 4 plantas por cajón. Si bien el sistema permite distintos tipos de configuraciones, la actualmente en producción permite obtener 240 plantas adultas (4 plantas por cajón x 12 cajones por nivel x 5 niveles de producción). El sexto nivel se destina a la producción de los plantines necesarios para abastecer las 240 plantas para cargar el sistema, obtenidas en bandejas de 54,5 cm x 28 cm x 4 cm, mientras que en el espacio restante se pueden colocar 10 bandejas más para la producción de microgreens (germinados), dándole al módulo un mayor dinamismo en la producción de alimentos. Los germinados requieren solo 15 días para ser cosechados, la mitad del tiempo necesario para la cosecha de una planta adulta anclada al sistema principal producción. Los cajones de producción drenan los excedentes de solución a 5 tanques o cisternas de 180 L de capacidad individual, mediante un caño colector principal de 63 mm. Los caños cuentan con juntas de goma de alta estanqueidad y así, la recirculación de la solución en el circuito cerrado otorga al sistema productivo una alta eficiencia en el uso de agua. La profundidad de inmersión máxima de las plantas es de 12 cm, de los cuales 10 son utilizados por la solución nutritiva, dejando 2 cm para el intercambio gaseoso y la respiración de las raíces. Esta lámina gaseosa “intermedia” no se usa en métodos como el NFT (Nutrient Film Technique) o el DFT (Deep Flow Technique), (quizás los más difundidos), como tampoco en otras técnicas de producción hidropónica con sustrato o mediante aeroponía. Es importante entender que el uso de una lámina intermedia cobra relevancia en un ambiente como el de la Antártida ya que su principal objetivo es modificar las características nutricionales en la solución, permitiendo la fijación de oxígeno atmosférico (como en NFT), pero con una lámina más importante, que resista el mantenimiento de las plantas en intervalos de bombeo superiores a 40 minutos (como DFT). Esto también permite disminuir el uso de la bomba (menor desgaste y mantenimiento), optimizando el consumo eléctrico y sostener el crecimiento de las plantas sin aporte de solución hasta por 24 horas.



Figura 1. Módulo Antártico de Producción Hidropónica (MAPHI) realizado en un contenedor marítimo de 20 pies, revestido y aislado térmicamente. A) Esquema general del Módulo, con mesada de trabajo, tablero eléctrico, tres niveles de producción y los tanques de almacenamiento de agua sobre el piso. B) foto del módulo en producción: la izquierda los tres niveles productivos con lechuga (abajo) y rúcula (medio y superior), y a la derecha los dos niveles superiores con lechuga mientras que el nivel inferior contiene las bandejas con los plantines para reposición.

Sistema de luces y calefacción

Cada nivel de producción cuenta con un sistema de luces de sodio de alta presión (SAP), compuesto por tres lámparas T-SON de 400W, accionadas desde un balasto encapsulado IP 22. El fotoperíodo es de 8 horas por cada nivel, encendiéndose automáticamente vía programador analógico instalado en el tablero de comando. La cantidad de luz fotosintéticamente activa entregada por las lámparas fue medida con una barra PAR Apogee Modelo WQ-301, tomando 3 mediciones en cada uno de los niveles. Estas lámparas emiten calor y, por sí solas, permiten alcanzar los 26° C en el interior del módulo de producción. La calefacción entregada por las luminarias de producción se complementa con un panel calefactor de bajo consumo de 620 W, que funciona como apoyo ya que solo se acciona cuando en el interior del módulo la temperatura desciende por debajo de los 15° C. La temperatura del módulo se monitorea mediante 4 sensores distribuidos en los niveles 1 y 4 (sector inferior) y niveles 3 y 6 (sector superior). Estos sensores registran la temperatura en intervalos de dos horas. Todos los sistemas necesarios para la producción de los cultivos están centralizados en un tablero de comando, centro neurálgico del módulo MAPHI, que permite la programación de los servicios, el corte de emergencia de los mismos y la entrega el suministro eléctrico para las luces, bombas, red de datos y sensores del sistema de telemetría.

Características del agua para la producción

La Base Marambio abastece a su personal a partir de dos fuentes de agua de consumo: (i) nieve derretida, principalmente durante los meses de invierno (conductividad eléctrica promedio de 0,64-0,7 mScm⁻¹; sólidos totales disueltos de 41-64 mg/l; pH entre 8,0-8,5); y (ii) bombeo desde una laguna cercana durante año redondo y con exclusividad durante los meses cálidos (conductividad eléctrica estandarizada entre 2,3-5,8mScm⁻¹ mayormente debida a la presencia de sulfatos; sólidos totales disueltos de 1.420-2.200 mg/l; pH entre 7,2-8,7). Estas

mismas fuentes de agua fueron las utilizadas para la producción hidropónica durante el primer ciclo de cultivo, en una proporción de 75 % agua de laguna y 25% agua de nieve derretida. La conductividad eléctrica del agua y la cantidad de sólidos disueltos fue medida in situ con una sonda multiparámetro SPER SCIENTIFIC WaterMeasurement Kit y sus diferentes sensores específicos. Asimismo, se colectó una muestra simple de agua de la fuente Laguna Principal, se acondicionó para transporte y se mantuvo refrigerada a $\pm 4^{\circ}\text{C}$ hasta su destino final en laboratorio de Río Gallegos para realizar análisis físico –químicos y completar su caracterización.

Solución nutritiva

La solución nutritiva se preparó siguiendo la fórmula propuesta por Resch (1990) para lechuga, quedando la concentración final de nutrientes como se describe a continuación (en ppm): nitratos 165,1; fosfatos 73; potasio 210,2; calcio 191,7; magnesio 50; sulfatos 67,9; hierro 5; manganeso 0.5; cobre 0,1; zinc 0,1; boro 0,5 y molibdeno 0,02. Los fertilizantes utilizados para lograr estos aportes fueron: nitrato de calcio, nitrato de magnesio, nitrato de potasio, sulfato de cobre, mix de micronutrientes comercial, hierro EDTHA, calcio en solución líquida, boro en solución líquida y manganeso en solución líquida. Se realizaron controles semanales de la conductividad eléctrica (CEE) y pH de la solución nutritiva manteniéndola dentro en un rango de CEE entre $2,4 \text{ mScm}^{-1}$ hasta un máximo de $3,0 \text{ mScm}^{-1}$ durante todo el ciclo de cultivo, realizando correcciones de la misma cuando los controles dieran por fuera de éstos.

Proceso productivo para obtención de las plantas

El proceso productivo se simplificó y automatizó lo más posible con el objetivo de hacerlo factible de operación a cualquier persona con o sin conocimientos previos de la técnica. El período de cultivo es de 30 días para plantas de ciclo completo y de 15 días para microgreens. En el ciclo completo se necesitan dos etapas bien definidas. La primera, es la siembra de las semillas en cubos de espuma fenólica, la cual se realiza con al menos dos semillas de la especie a cultivar, depositadas directamente en la perforación del cubo. Un lote de estos cubos, hasta un máximo de 260, se coloca acomodado en una bandeja plástica que retiene el agua (o la solución) necesaria para la germinación. El sistema de riego de estas bandejas es por capilaridad, con un intervalo de riego de 48 horas. Una vez que la planta emerge, el agua de riego es reemplazada por solución nutritiva hasta que se cumplen 15 días desde la fecha de siembra, momento en el cual se realiza el trasplante a los cajones de producción y se inicia la segunda etapa del ciclo. El trasplante se hace directamente a las canastillas de los cajones de producción, aprovechando el troquelado de los cubos, que permite su extracción con relativa facilidad. Las plantas pasan otros 15 días más en los cajones de producción hasta su cosecha para consumo. El proceso de producción de los microgreens es más corto y sencillo, ya que la planta nunca se trasplanta, y, aunque recorre el mismo proceso de producción que las adultas, son retiradas luego de los primeros 15 días desde la siembra, directamente a consumo. Por normas ambientales del Tratado Antártico, al finalizar tres ciclos del cultivo, el sistema de producción se “resetea” mediante una limpieza y desinfección de todos sus componentes, siendo necesario en este caso la utilización de paños embebidos en un desinfectante clorado o con base en alcohol isopropílico. Esto disminuye las probabilidades de proliferación de patógenos y posibilita un mejor aprovechamiento del agua.

Especies en producción y método de muestreo



Las especies cultivadas fueron seleccionadas por su baja adaptación al frío, a fin de anular su capacidad germinativa y de instalación en caso de una eventual diseminación accidental de semillas. Se utilizaron para la primera producción del proyecto lechuga (*Lactuca sativa*, variedad Grand Rapid) y rúcula (*Eruca sativa*). La primera cosecha se realizó a los 30 días de iniciado el cultivo. En ese momento, de cada especie, se muestreó al azar una planta por cajón, en cada uno de los niveles productivos, obteniendo así un total de 12 repeticiones por nivel. De cada muestra se determinó el peso en fresco de la parte aérea y el peso fresco de la raíz. Posteriormente, las muestras se llevaron a secar en estufa durante 72 hs hasta obtener peso constante (peso seco). La producción total en fresco (PTF) del Módulo se obtuvo de multiplicar el peso medio aéreo/planta (en fresco) por la cantidad de plantas en un cajón (4) por la cantidad de cajones en cada nivel (12) y por cada uno de los niveles productivos, que eran 5 en total: 3 niveles para lechuga y 2 niveles para rúcula. Quedando entonces la PTF de cada especie como:

PFT de lechuga = peso medio/planta x 4 x 12 x 3 y PFT de rúcula = peso medio/planta x 4 x 12 x 2

Supervisión, adquisición de datos y control: SISTEMA IoT

El módulo de producción cuenta con un sistema integrado de telemetría, que incluye sensores, actuadores y software desarrollado en el marco de las tecnologías IoT (Internet of Things – Internet de las cosas), tendiendo a la utilización de hardware de bajo costo y software libre, lo que ha resultado en el diseño, documentación y fabricación de toda la electrónica y software de sensorización del módulo. La utilización de herramientas de control automático o semiautomático de las variables ambientales que impactan en el desarrollo de las plantas permite garantizar su estabilidad, aportando calidad a la producción y una mayor homogeneidad del cultivo. Entre los principales sensores con los que cuenta el Módulo y las variables que son factibles de monitorear de manera remota se encuentran: temperatura del aire, humedad relativa, caudal de la solución circulante en cada nivel, disponibilidad de agua y de soluciones, temperatura de la solución, alarma ante derrames, alarma de presencia de llamas, alarma de presencia de humo, consumo eléctrico y estabilidad de la línea eléctrica.

En cuanto a su arquitectura, un modelo IoT genérico se representa con cinco capas:

- 1) Capa de objetos o percepción: Recolecta e intercambia información entre los sensores de los objetos físicos. Se integra por sensores y actuadores que proveen las diferentes funcionalidades. Los datos son transferidos a la capa de red.
- 2) Capa de red o transmisión: Transfiere de forma segura la información de los dispositivos sensores al sistema de procesamiento de información (siguiente capa).
- 3) Capa de middleware: Responsable de la gestión del servicio y tiene un enlace a la base de datos. Recibe la información de la capa de red y la deposita en la base de datos. Realiza el procesamiento de información y la computación ubicua toma decisiones automáticas en función de los resultados.
- 4) Capa de aplicación: Proporciona una administración global de la aplicación basada en la información de los objetos procesados en la capa de middleware.

5) Capa de Negocio: responsable de la administración del sistema general de IoT, incluidas las aplicaciones y los servicios. Construye modelos de negocio, gráficos, diagramas de flujo, etc., en función de los datos recibidos de la capa de aplicación.

En el desarrollo realizado para el proyecto MAPHI, estas capas se encuentran implementadas como se describe a continuación:

1) Capa de objetos o de percepción

Los dispositivos multipropósito elegidos son los módulos ESP12 (NodeMCU) y ESP01, ambos basados en el chip procesador ESP8266 que integra el soporte para comunicaciones WiFi (802.11 b/g/n) y la pila completa de protocolos TCP/IP. Se ha optado por esta tecnología por ser módulos de bajo costo, de gran disponibilidad en el mercado local, y por disponer de numerosas y variadas librerías de programación de código abierto (open source). Su programación está soportada por el conocido y versátil IDE de Arduino. Para la fabricación de los sensores se han diseñado e implementado dos motas multipropósito, con un software embebido configurable al momento de la compilación. El módulo M31 se basa en el módulo ESP-01, mientras que el tipo M32, se diseñó a partir de la plaqueta de desarrollo NodeMCU 8266 dev-kit que contiene el módulo ESP-12. La totalidad de las capacidades requeridas por el sistema se distribuye entre las dos tarjetas electrónicas de la siguiente manera: (a) M31: Temperatura aire (T_a), Humedad relativa (%hum), Temperatura líquido/solución (T_{sol}), Nivel líquido/solución (N_{sol}), Derrame, Llama, humo; y (b) M32: Potencial de Hidrógeno (pH), Caudal líquido/solución (Q), Conductividad Eléctrica (EC), Temperatura líquido/solución (T_{sol}), Dióxido de Carbono (CO_2), Oxígeno Disuelto (DO), Tensión Instalación (V_{efR} y V_{efS}), y Corriente Instalación (I_{efR} y I_{efS}). Los módulos ESP01 tienen la ventaja de ser más pequeños y económicos que los ESP12 y se pueden utilizar cada vez que se precise contar con hasta 4 puertos digitales de propósito general (GPIOs), y sólo cuando no se requiera medir una señal analógica. En caso contrario se recurre a la ESP12 que cuenta con una entrada Analógico/Digital (A/D) y una gran cantidad de puertos GPIO. Todos los sensores y actuadores desarrollados en esta etapa se comunican con uno de estos módulos, ya sea por un puerto digital de propósitos generales (GPIO), o por el único puerto analógico disponible, A0 (solo en el caso del ESP12). Cualquier sensor analógico del sistema (por ejemplo, sensores de nivel, pH, transductores de tensión y corriente, etc.), debe entregar una señal de tensión convenientemente acondicionada, que se digitaliza mediante el conversor A/D en el puerto A0. Cualquier sensor digital entrega una señal binaria en niveles lógicos de 0 a 3.3V que puede procesarse, ya sea directamente, o mediante un driver que maneje un protocolo de transmisión serie de entre los siguientes: 1-Wire, I2C, SPI o UART.

2) Capa de red o transmisión

Las motas descritas en la sección precedente hacen necesario contar con una tecnología que permita tanto el envío de datos desde las mismas (telemetría), como la comunicación en sentido inverso (accionamiento de los actuadores). Puntualmente en este desarrollo, la tecnología de acceso elegida es WiFi, debido a que utiliza un espectro de frecuencia sin licencia, un buen nivel de seguridad y facilidad de implementación. El módulo ESP8266 puede funcionar tanto como estación (modo STA), como punto de acceso (modo SoftAP) o en ambos simultáneamente. Este último modo permite implementar redes tipo mallada (mesh). En nuestro sistema, se ha utilizado exclusivamente el modo STA, para acceder a una red de área local con conectividad a Internet mediante un router de borde. Naturalmente las tramas

WiFi se encapsulan en paquetes IPv4 que a su vez se transportan mediante segmentos UDP/TCP.

3) Capa de middleware

El middleware tiene varias funciones, como la gestión de dispositivos y datos, la gestión de aplicaciones, adaptación de protocolos, analítica, etc. El módulo de gestión de aplicaciones provee una interfaz para que las aplicaciones de alto nivel y los usuarios interactúen con los dispositivos. El gestor de aplicaciones proporciona un mecanismo de autenticación de usuarios mediante credenciales para acceder a la información bajo un paraguas de seguridad en cuanto a la exposición de los datos. Dispone de una interfaz de programación de aplicaciones (API por sus siglas en inglés), donde se establecen un conjunto de subrutinas, procedimientos y funciones que facilitan la comunicación e interacción, con cierto nivel de abstracción, entre aplicaciones y dispositivos IoT.

En una primera etapa se ha utilizado ThingSpeak, una plataforma IoT de uso gratuito, que permite almacenar, mediante el envío de datos a través de internet, los datos de los dispositivos IoT, a través de un API que opera sobre el protocolo HTTP. De esta manera cada sensor, con acceso a internet, transmite la información periódicamente hacia la nube, alojando los datos en lo que la plataforma denomina canales. En esta etapa los dispositivos actuadores se accionaban haciendo uso de la aplicación MathWorksTalkBack, que brinda la posibilidad de generar una cola de comandos en la nube, para ser consumidos por los sensores. Actualmente, las motas multipropósito implementan MQTT. La telemetría de todas las variables de interés utiliza el protocolo MQTT, basado en la publicación y suscripción (P&S) por tópicos (variables), donde los datos se recolectan (y transmiten) cada 30 segundos. Este protocolo ligero es altamente eficiente y posibilita el funcionamiento en redes con reducido ancho de banda y elevada latencia tales como aquellos que se dan en enclaves geográficos posiblemente extremos. El intermediario (broker) requerido por MQTT consiste en el programa open source Eclipse Mosquitto que se instala en un hardware de bajo costo del tipo Raspberry PI, o alternativamente se puede desplegar en servidores dedicados de elevada disponibilidad, máquinas virtuales, etc. La información publicada por los sensores se recolecta haciendo uso del agente Telegraf, almacenada tanto en forma local como en un servidor en el continente sobre bases de datos de series de tiempo InfluxDB. Localmente, el dispositivo Raspberry Pi implementa a través del sistema para despliegue de contenedores Docker, los citados Mosquitto, Telegraf e InfluxDB. Esto facilita un rápido despliegue de los servicios y su posterior administración. Actualmente los actuadores se accionan también por MQTT. Así, se tiene el gobierno en forma remota de un termostato ambiente y un calefactor, pudiendo activar las combinaciones necesarias para verificar el estado de aislamiento térmico del módulo y analizar su correlación con la temperatura externa.

4) Capa de aplicación

Esta es la capa que brinda los servicios verticales. La infraestructura propuesta se basa principalmente en un producto de software que permita visualizar las variables recolectadas de los sensores en una serie de gráficos y reportes estadísticos que muestren el estado de todas las variables de interés para el cultivo y su evolución en el tiempo. En una primera instancia, a fin de monitorear los prototipos, se desarrolló una aplicación en lenguaje HTML y JavaScript, que se comunica a través del API proporcionado por el servicio ThingSpeak para obtener la información almacenada en la nube y luego desplegarla en un tablero de control accesible vía

web. Actualmente los datos recolectados se presentan en un panel de control que puede ser visualizado tanto en forma local como remota a través del protocolo HTTP, implementado mediante la herramienta Grafana (<https://iot.uarg.unpa.edu.ar/maphi/>). A su vez, se ha implementado un servicio para el envío de comandos, para ser ejecutados en el bróker. Esto permite la realización de distintas tareas, como ser la administración de dicho equipo, y también la operación sobre los sensores y actuadores, por ejemplo, para el cambio de estado de los relés de control de calefacción y termostato. El panel de control incorpora además dos imágenes de alta definición obtenidas cada hora, para permitir el control visual del crecimiento y el estado de los plantines, complementando de este modo la información numérica de los sensores IoT.

5) Capa de negocio

Dentro de lo concerniente a las actividades en esta capa, con el objetivo de optimizar la producción de productos frutihortícolas, y buscando utilizar de manera eficiente los recursos tales como la energía, nutrientes, agua y mano de obra, se está organizando un conjunto de técnicas tales como la minería de datos, el aprendizaje automático (redes neuronales, Deep learning, etc.), y herramientas o plataformas para el análisis de datos, tales como BigML, a través de las cuales se podrá analizar la información recolectada, a fin de establecer una configuración que permita maximizar la producción de frutas y verduras dentro del módulo.

Para la implementación del sistema integrado fue necesario en primera instancia garantizar el adecuado funcionamiento, en este ambiente extremo, de la alimentación eléctrica de todos los componentes. Para ello se diseñó, documentó e instaló un Subsistema eléctrico para todo el módulo. El subsistema eléctrico se alimenta desde una acometida de energía trifásica, utilizando las primeras dos fases de la secuencia RST y repartiendo las cargas de forma balanceada. El tablero eléctrico cuenta con protecciones diferenciales y termomagnéticas generales y con un botón de parada de emergencia. Las cargas se dividen por circuitos para proporcionar una elevada tolerancia a fallos y una elevada disponibilidad. En particular, las luces destinadas al crecimiento de las plantas se reparten en dos fases diferentes, de forma que en caso de perderse una de estas, sólo la mitad de las luces queda afectada. Además, cada uno de los seis sectores de producción tiene un circuito separado para la iluminación de las plantas. Se emplea un total de 18 lámparas de sodio de alta presión de 400W cada una, con sus correspondientes reactancias, compensadores de factor de potencia e ignitores. El módulo cuenta con ventiladores para revolver (stirring) el aire en el interior del recinto a fin de uniformizar la temperatura. Las cargas críticas, consistentes en la electrónica de red (router, switch, Access Point), cámaras, nDVR, servidores, monitor y sensores de variables, están respaldadas mediante un sistema de alimentación ininterrumpida en un circuito independiente protegido. El tablero cuenta con elementos de control de actuación electromecánicos (timers) que pueden ser puenteados para asumir el control desde la inteligencia digital, local o remota.

RESULTADOS

Variables ambientales durante el período de producción: Temperatura del Aire

La temperatura media del aire en el interior del módulo a lo largo del primer ciclo productivo, comprendido entre el 20 de mayo y el 16 de julio de 2022, fue de 24,9 °C, con importantes diferencias de temperatura entre los niveles del módulo, observándose una media de 21,2 y

28,6 °C para los niveles de inferior y superior, respectivamente (Figura 2). En los niveles inferiores de producción la temperatura osciló entre 16 y 25 °C mientras que en los niveles superiores estuvo entre los 23 y 34 °C (Figura 2).

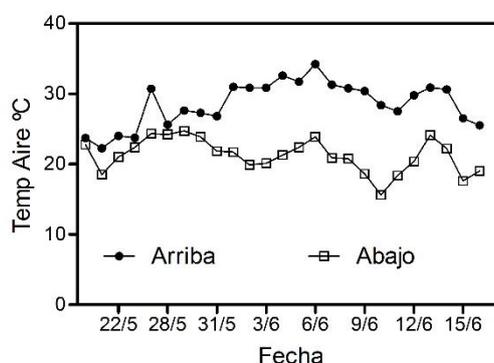


Figura 2. Temperatura media diaria del aire en el interior del módulo durante el ciclo productivo, obtenida mediante cuatro sensores que miden cada dos horas, dos ubicados en el nivel superior de producción (arriba) y dos en los niveles inferiores (abajo).

Variables ambientales durante el período de producción: características del agua utilizada

La Tabla 1 muestra el resultado del análisis físico químico realizado al agua proveniente de la fuente “Laguna” que se utilizó para el armado de la solución nutritiva. Se destaca una alta proporción de sólidos totales disueltos, sulfatos y cloruros (Tabla 1).

PARÁMETRO	UNIDAD	FUENTE: LAGUNA
Bicarbonato (HCO_3^-)	mg/l	47,0
Calcio (Ca)	mg/l	6,0
Carbonatos (CO_3^{2-})	mg/l	0,0
Dureza Total (CaCO_3)	mg/l	30
Cloruro (Cl)	mg/l	427,0
Conductividad (C_{E})	mS/cm	0,4 – 5,8
Magnesio (Mg)	mg/l	4,0
Nitrato (NO_3)	mg/l	1,3
Nitrógeno total	mg/l	1,74
Zinc (Zn)	mg/l	0,07
pH	adimensional	7,2 – 8,7
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	321 – 2.970
Sulfato (SO_4)	mg/l	112,0

Tabla 1. Características físico-químicas del agua proveniente de “La Laguna” que abastece a Base Marambio para consumo y que fue utilizada para el armado de la solución nutritiva del proyecto MAPHI.

Variables ambientales durante el período de producción: Solución nutritiva

Teniendo en cuenta las características químicas del agua utilizada, para el armado de la solución nutritiva se priorizó la utilización de fertilizantes libre de sulfatos, ya que estos se encuentran en cantidad suficiente en el agua utilizada (Tabla 1). En general, la conductividad eléctrica estandarizada a 25 °C (C_{E}) de la solución varió entre 2,34 y 2,55 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,

mostrando en una única oportunidad valores inferiores del orden del 1,44 (Figura 3 A). Esta variación se debió a la utilización de agua de nieve en mayor proporción para el armado de la solución nutritiva. El valor promedio de pH de la solución a lo largo del ciclo productivo fue de 6,7 con valores mínimos y máximos de 6,3 y 7,2, respectivamente (Figura 3 B). Con respecto a la temperatura de la solución, ésta osciló entre 17 y 22 °C (Figura 3C), mientras que el oxígeno disuelto varió entre 6,3 y 9,0 mg/L, durante el ciclo de producción (Figura 3D).

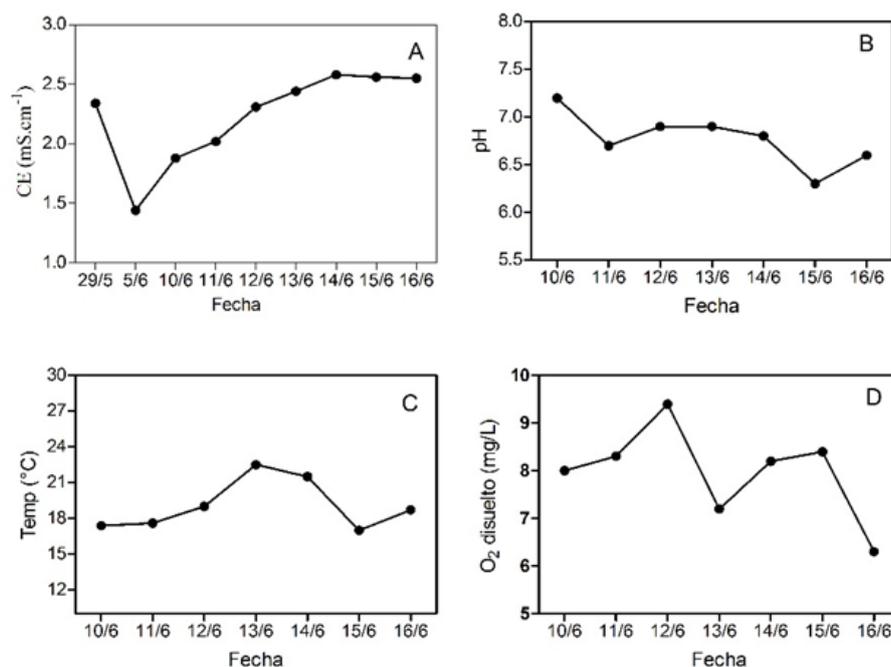


Figura 3. Monitoreo de los parámetros de A) conductividad eléctrica estandarizada, B) pH, C) temperatura de la solución y D) cantidad concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva utilizada para la producción de lechuga y rúcula en un el Módulo Antártico de Producción Hidropónica.

Monitoreo a distancia con tecnología IoT

La tecnología IOT instalada permite controlar a distancia, mediante una pantalla, distintas variables del módulo que arrojan datos en tiempo real de las mismas. En la Figura 4 se muestra una captura de pantalla de las variables monitoreadas en tiempo real. En la parte superior derecha, se observan dos imágenes tomadas por cámaras de alta definición que da una idea general del estado actual del cultivo y permite su seguimiento. Por debajo de estas imágenes, se observan las condiciones climáticas externas (temperatura exterior del aire, sensación térmica, humedad relativa porcentual, presión atmosférica y velocidad de viento). Seguidamente, abajo en el lado izquierdo, se pueden ver en distintos colores el estado actual de la temperatura en cada uno de los niveles productivos del interior del módulo. El color del cuadro verde indica que la temperatura está normal, mientras que, si aparece en color amarillo, indica que la temperatura está próxima a superar el nivel óptimo y el color naranja o rojo indican que la temperatura de ese nivel ya está por encima del óptimo para el cultivo. A continuación de estos cuadros, pero del lado derecho, se puede observar la humedad relativa en cada uno de los niveles de producción. Por debajo de los cuadros de temperatura y humedad, la pantalla muestra las gráficas históricas de temperatura (izquierda) y humedad relativa (derecha), respectivamente. A continuación de estos gráficos se observan datos de la solución nutritiva. A la izquierda está la cantidad de solución que está entregando la bomba en

tiempo real (relojes) mediante los niveles de los caudalímetros de cada uno de los tanques y los niveles históricos (gráfico de barras en naranja). A su derecha, se observa el porcentaje de agua disponible en el tanque de agua y en el tanque de la solución nutritiva, la temperatura de la solución nutritiva y por debajo de estos se observan (actualmente en color verde, pero pueden variar a amarillo o rojo) botones que indican la información brindada por los sensores de iluminación, derrame, humo y llama (Figura 4). Por último, en la parte inferior de la pantalla, se observa un gráfico que el consumo eléctrico histórico del Módulo de Producción en su conjunto (Figura 4).



Figura 4. Captura de pantalla del panel de control y monitoreo que se genera a partir de la tecnología IoT instalada. Se observan distintos parámetros como la temperatura del aire exterior, interior, humedad relativa, estado general del cultivo (mediante cámaras de alta definición), nivel de los tanques de agua y solución nutritiva, estado Ok de los sensores de iluminación, derrame, humo y llama, y por debajo el consumo eléctrico histórico del módulo en su conjunto.

Producción de Verdura

El módulo en su carga máxima de los cajones hidropónicos fue capaz de producir un total de 144 plantas de lechuga y 96 plantas de rúcula, no registrándose ninguna pérdida por mortandad en las plantas trasplantadas a los cajones. El peso fresco medio por planta fue de 108,2 y 45,4 g para lechuga y rúcula, respectivamente (Figura 5 A). Asimismo, la producción total resultante del módulo, para la primera cosecha fue de 15,6 Kg de lechuga y 4,4 Kg de rúcula (Figura 5 B). En promedio, las plantas de lechuga contenían un 94,7 % de humedad mientras que las rúculas presentaron un 90,2%. En cuanto a la producción de raíces, en promedio las lechugas presentaron un peso fresco de 23,9 g (\pm 9 g) mientras que las rúculas tuvieron un peso fresco de 14,9 g (\pm 5 g), obteniendo una relación raíz/tallo de 0,24 y 0,39 para lechuga y rúcula, respectivamente.

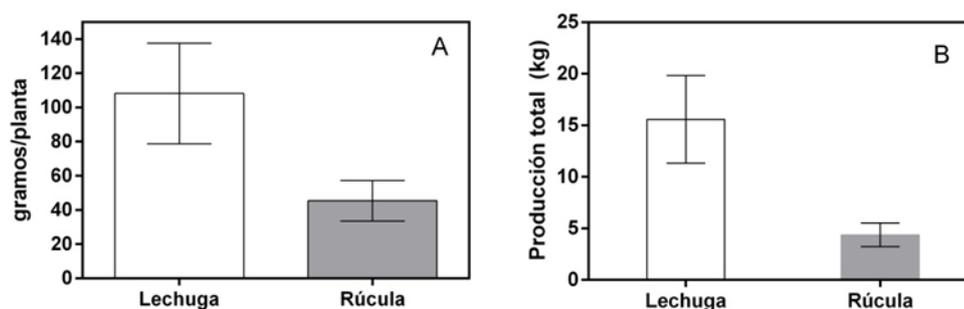


Figura 5. Rendimiento promedio por especie cultivada en el primer ciclo productivo del módulo MAPHI, de 30 días de duración: A) Peso medio aéreo de las plantas de lechuga y rúcula al momento de la cosecha (30 días posterior a la siembra), realizado en la Base Marambio (Antártida Argentina), mediante un sistema hidropónico indoor en un contenedor marítimo con luces artificiales. B) Producción total en fresco obtenido en el módulo, contabilizando 3 niveles productivos para lechuga y dos niveles para rúcula.

DISCUSIÓN

En el presente trabajo se presentó una detallada descripción del Módulo Antártico de Producción Hidropónica instalado en la Base Marambio, como así sus primeros datos de producción y monitoreo de variables ambientales. Los valores de producción obtenidos para lechuga en este estudio (108 gr/planta) fueron superiores a los informados por Shultz et al. (2020) para lechuga creciendo en un sistema de acuaponía bajo luces similares a las utilizadas en el módulo MAPHI (60 gr/planta). Asimismo, otros autores evaluando producción de lechuga pero bajo sistemas de luces LED han informado valores superiores de producción en fresco (Matysiak et al., 2022; Shultz et al., 2020).

Es importante destacar que el módulo logró producir 15,6 kg de lechuga fresca y 4,4 kg de rúcula, cantidad de verdura que alcanzó para abastecer a toda la dotación de la BAC Marambio, obteniendo incluso algunos sobrantes para almacenamiento. Considerando una porción media de lechuga y rúcula de entre 55 y 80 g para un plato, como acompañamiento de otras comidas, el rendimiento obtenido en el primer ciclo productivo equivale estimativamente a unas 250 a 363 raciones o porciones. En forma equivalente, si se planteara el uso alternado de un 50% de la superficie productiva del módulo para un cultivo escalonado que permitiese cosechas cada 15 días (en lugar de 30 días), éstas permitirían entre 125 y 181

porciones. Teniendo en cuenta que la dotación de personal que suele permanecer en Marambio durante todo un año es de unas 80 personas, este rendimiento significa la posibilidad de contar con 2 comidas basadas en verdura fresca, para todo el personal, cada 15 días, con una producción potencial de 240 kg anuales de verdura fresca. Los valores de producción obtenidos como así también de las variables ambientales monitoreadas, se encontraron en el rango de lo informado como óptimo para el cultivo de lechuga (Resh, 1997), lo que indica que la producción logró efectuarse con resultados favorables en un medio totalmente controlado y con los cuidados necesarios según lo establecido en el Protocolo de Protección del Ambiente del Tratado Antártico. Es importante mencionar, que según datos informados por Bimsey et al (2015), de los 9 países que actualmente realizan producción de cultivos en la Antártida, solo cuatro de ellos (Australia, Corea, Estados Unidos y Alemania) lo hacen en condiciones Indoor (lo que permite tener verduras frescas todo el año) y a una escala tal que permite abastecer a la dotación que permanece en el invierno. En este sentido, se destaca que la Argentina se suma con el proyecto MAPHI a la lista de los pocos países que pueden garantizar una mejor calidad de vida a sus dotaciones a través de una mejora en la alimentación mediante la incorporación de verduras frescas, y de los beneficios psicológicos de tener un espacio de contacto con plantas (Ulrich y Parson, 1992; Parson et al., 1994). Otro aspecto importante es que luego del período de instalación y puesta en marcha del módulo, se logró capacitar a personal de la dotación para el manejo del mismo y hoy está siendo operado por personal de la base. Asimismo, gracias a la tecnología IoT instalada, los parámetros del cultivo son monitoreados en tiempo real a distancia por ingenieros del INTA quienes, al detectar anomalías, se comunican con el personal de la base para hacer las correcciones pertinentes. El presente proyecto demuestra un gran aporte de tecnología aplicada en un lugar ambientalmente extremo, que contribuye en gran medida a mejorar la calidad de vida del personal destinado a trabajar en las bases antárticas, aportando de manera fundamental en garantizar la Soberanía Alimentaria en todo el territorio nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- BAENA RUIZ, R. y TORIJASISA, E. 2001. Riesgos y beneficios de los aditivos alimentarios. Elsevier Offarm 20(1), 104-115. ISSN: 0212-047X
- BAMSEY, M. T., ZABEL, P., ZEIDLER, C., GYIMESI, D., SCHUBERT, D., KOHLBERG, E. & GRAHAM, T. 2015. Review of Antarctic greenhouses and plant production facilities: A historical account of food plants on the ice. 45th International Conference on Environmental Systems.
- BEJARANO RONCANCIO, J.J. y SUÁREZ LATORRE, L.M. 2015. Algunos peligros químicos y nutricionales del consumo de los alimentos de venta en espacios públicos. Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud 47(3), 349-360. <https://doi.org/10.18273/revsal.v47n3-2015011>
- FONTANA, P.G. 2018. La pugna antártica. Ed. Guazuvira, Buenos Aires. 324p.
- HAEUPLIK-MEUSBURGER, S., PATERSON, C., SCHUBERT, D., and ZABEL, P., 2013. "Greenhouses and their humanizing synergies," Acta Astronautica, Vol. 96, pp. 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.11.031>
- MATYSIAK, B., ROPELEWSKA, E., WRZODAK, A., KOWALSKI, A., Kaniszewski, S. 2022. Yield and quality of romaine lettuce at different daily light integral in an indoor controlled environment. Agronomy, 12 (5), p. 1026. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051026>

- PARSONS, R., ULRICH, R. S., & TASSINARY, L. G. (1994). Experimental approaches to the study of people-plant relationships. *Journal of Home y Consumer Horticulture*, 1(4), 347-372. https://doi.org/10.1300/J280v01n04_06
- PATHAK, R. C., and GANGADHARA, R. S., "Some constructional, environmental control and plant growth aspects of green house at Indian Antarctic station 'Maitri'," Scientific Report: Ninth Indian Expedition to Antarctica. Vol. 6, Department of Ocean Development, 1994, pp. 299-311.
- RESH, H.M, 1990. Hydroponic home food gardens. Santa Bárbara C.A, Woodbridge, 1990. In: Resh, H. M. (1997). *Cultivos hidropónicos: nuevas técnicas de producción*. Ediciones Mundi-Prensa.
- RESH, H. M. 1997. *Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción*. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, Barcelona México. 509pp.
- SHULTZ, R. C., COYLE, S. D., BRIGHT, L. A., HAGER, J. V., & TIDWELL, J. H. 2022. Evaluation of different artificial light technologies for indoor aquaponic production of Bibb lettuce, *Lactuca sativa* var. capitata, and compact basil, *Ocimum basilicum* var. Genovese. *Journal of the World Aquaculture Society*, 53(3), 703-713. <https://doi.org/10.1111/jwas.12860>
- TRATADO ANTÁRTICO. Protocolo de protección Ambiental del Tratado Antártico. Madrid, España, 1991.
- ULRICH, R. S., & PARSONS, R. (1992). Influences of passive experiences with plants on individual well-being and health. *The role of horticulture in human well-bein*