

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EFECTO DE VARIABLES PRODUCTIVAS EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO ORBITAL
COMPUTARIZADO SOBRE CARACTERÍSTICAS COMERCIALES DE LECHUGA
(*LACTUCA SATIVA L.*)

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Posgrado en Ingeniería
de Biosistemas para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería de
Biosistemas.

SERGIO JOSÉ ROJAS MONTERO

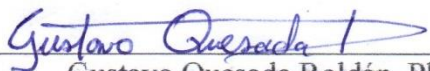
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2023

AGRADECIMIENTOS

Extiendo mis más sinceros agradecimientos al equipo docente que participó directamente en la elaboración de esta investigación, conformado por Mauricio Bustamante, Carlos Rojas y Werner Rodríguez, su apoyo, experiencia y conocimiento se ven plasmados en esta tesis. Agradezco a Ensio Pérez el cual con su pericia, ingenio y proactividad resultó ser un actor clave en la elaboración de esta investigación. A Geovanni Carmona, Pedro Casanova y Anayansi Wong les extiendo mis agradecimientos ya que indirectamente aportaron a este proyecto fomentando la búsqueda de la excelencia, derribar los límites, explorar lo desconocido y retener la calidad humana. Finalmente agradezco profundamente a Grace Rojas y Kimberly Soto por ser pilares inquebrantables en los cuales apoyarme y refugiarme en tiempos de flaqueza.

“Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería de Biosistemas”



Gustavo Quesada Roldán, PhD
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado**



Ing. Mauricio Bustamante Román, PhD
Profesor Guía



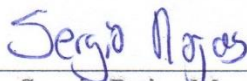
Carlos Rojas Alvarado, PhD
Lector



Werner Rodríguez Montero, PhD
Lector



Ing. Alejandra Rojas González, PhD
Directora del Programa de Posgrado en Ingeniería de Biosistemas



Sergio Rojas Montero
Sustentante

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	ii
HOJA DE APROBACIÓN	iii
RESUMEN	vi
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo General.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Relación entre cambio climático y la agricultura.....	5
2.1.1 Temperatura	5
2.1.2 Políticas hacia el sector agrícola.....	5
2.1.3 Producción de alimento en las ciudades	6
2.2 Fábricas de plantas con luz artificial	6
2.2.1 La estructura de una PFAL	7
2.2.2 Ejemplos de implementación.....	8
2.2.3 PFAL como sistemas complejos.....	9
2.2.4 Métodos de producción en fábricas de plantas	10
2.3 Luz artificial en sistemas hidropónicos.....	13
3. METODOLOGÍA.....	16
3.1 Diseño del sistema de iluminación y caracterización	16
3.2 Caracterización del proceso de producción en SHIOC.....	16
3.2.1 Determinación de la velocidad de rotación.....	16

3.2.2	Diseño experimental y variables de respuesta	17
3.2.3	Análisis estadístico	19
3.3	Viabilidad industrial.....	19
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1	Sistema de iluminación LED	20
4.2	Interacción entre fotoperiodo y velocidad de rotación.....	23
4.2.1	Determinación de la velocidad de rotación.....	23
4.2.2	Caracterización de las condiciones iniciales.....	24
4.2.3	Análisis del efecto de borde.....	25
4.2.4	Comparación de condiciones iniciales y finales por tratamiento.	29
4.2.5	Análisis del efecto de fotoperiodo y la velocidad de rotación.	32
4.3	Viabilidad industrial.....	39
5.	CONCLUSIONES.....	44
5.1	Conclusiones del objetivo específico a.	44
5.2	Conclusiones del objetivo específico b.	44
5.3	Conclusiones del objetivo específico c.	44
6.	Recomendaciones	45
7.	BIBLIOGRAFÍA	46
8.	ANEXOS	52
8.1	Composición química de la solución hidropónica mayor	52
8.2	Composición química de la solución hidropónica menor	52
8.3	Código de análisis estadístico en R.....	52
8.4	Planos de diseño de SHIOC	55

RESUMEN

El aumento de la población humana en el 2050 demandará un aumento del 60% de la producción agrícola actual para satisfacer la demanda alimentaria. La población rural representará solo un 30% de la población total, lo que implica una menor mano de obra disponible para el sector agropecuario. La alteración en los patrones de lluvias y aumento de eventos climatológicos extremos a causa del cambio climático son realidades que el sector debe afrontar y que limitan su capacidad de producción. Los sistemas agrícolas convencionales a campo abierto e invernaderos pueden verse afectados por fenómenos extraordinarios como la pandemia del COVID-19 la cual perjudicó la cadena de exportaciones e importaciones y aumento las enfermedades en los productores, eventos meteorológicos extremos o aparición de plagas, lo que hace que una combinación de factores pueda poner en riesgo la seguridad alimentaria.

Las Fábricas de Plantas con Luz Artificial (PFAL por sus siglas en inglés) son un sistema artificial cerrado con potencial como método alternativo de producción agrícola. En el año 2018, el autor diseñó y construyó el Sistema Hidropónico Orbital Computarizado (SHIOC) como un prototipo de una PFAL, que al encontrarse en fase de desarrollo requería de más investigación para alcanzar eficiencias comerciáveis. Al ser un sistema donde interactúan múltiples parámetros interrelacionados y con efecto en el rendimiento agrícola, se considera como un sistema biocomplejo y debe ser abordado como tal.

Esta investigación tuvo como objetivo determinar la combinación de parámetros operacionales de SHIOC que permitieran obtener la mayor producción de biomasa de lechuga (*Lactuca sativa*). Se propusieron tratamientos donde se contempló la velocidad de rotación y el fotoperiodo y se realizó un análisis estadístico multivariado para determinar el efecto de cada factor. Finalmente, se compararon los resultados del modelo estadístico con los rendimientos de sistemas convencionales para determinar si es viable su uso industrializado.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Parámetros de monitoreo en una PFAL	10
Tabla 3-1. Resumen de tratamientos experimentales.	18
Tabla 4-1. Características técnicas de los LED.	20
Tabla 4-2. Composición de los lotes de las barras LED	21
Tabla 4-3. Resumen de condiciones iniciales.....	24
Tabla 4-4. Resumen de los bordes y centros para cada tratamiento.	26
Tabla 4-5. Resultados de varianza y prueba t-Student entre bordes y centros.	26
Tabla 4-6. Resumen de datos recolectados para cada tratamiento.	30
Tabla 4-7. Matriz de multicolinealidad.....	33
Tabla 4-8. Resultados de MANOVA.....	34
Tabla 4-9. Resultados de ANOVA de dos vías.	34
Tabla 4-10. Resultados de ANOVAS de una vía.....	35
Tabla 4-11. Potencia y consumo energético de SHIOC mensual.	39
Tabla 4-12. Comparación energética entre tratamientos.	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Recursos esenciales para producción en una PFAL.....	7
Figura 2-2. Flujos energéticos y másicos en sistemas de PFAL.....	8
Figura 2-3. (a) Fábrica de plantas Green Sense Farms, (b) Sistema de producción de Green Sense Farms,	9
Figura 2-4. (a) Fábrica de plantas Spread Co., Ltd, (b) Sistema de producción de Spread Co.,	9
Figura 2-5. Tipos de sistemas de producción en PFALs.	10
Figura 2-6. Prototipo experimental de SHIOC.	11
Figura 2-7. Componentes de SHIOC.....	12
Figura 2-8. Propuesta de uso de SHIOC de manera industrial	12
Figura 2-9. (a) Absorción relativa de luz visible para pigmentos de plantas según la longitud de onda. (b) Eficiencia relativa en fotosíntesis según la longitud de onda.....	14
Figura 3-1. (a) Contenedor plástico y (b) lana de roca dentro del contenedor.	17
Figura 4-1. LED utilizados y sus disipadores de calor.	20
Figura 4-2. Modelo de barra LED del tipo 1 con el diagrama de los módulos y configuración de colores.	21
Figura 4-3. Sistema de iluminación de SHIOC.	22
Figura 4-4. (a) Distribución espacial e (b) histograma de frecuencias del PPFd.....	23
Figura 4-5. Lechugas trasplantadas al sistema hidropónico orbital en el primer día.....	25
Figura 4-6. (a) Distribución de masa y (b) R-LA según ubicación y tratamiento.	27
Figura 4-7. Histograma de hojas del centro contra borde de T ₁	28
Figura 4-8. Histograma de hojas del centro contra borde de T ₂	28
Figura 4-9. Histograma de hojas del centro contra borde de T ₃	29
Figura 4-10. Distribución de la masa según tratamiento.	30
Figura 4-11. Distribución de la relación largo y ancho según tratamiento.....	31
Figura 4-12. Histograma de cantidad hojas según tratamiento.....	31
Figura 4-13. Masa inicial y final según tratamiento.	32
Figura 4-14. Relación entre largo y ancho inicial y final según tratamiento.....	32
Figura 4-15. (a) Análisis de homogeneidad de la varianza y covariancia y (b) linealidad...33	33

Figura 4-16. Comparación de masa según fotoperiodo.	35
Figura 4-17. Comparación de relación entre largo y ancho según fotoperiodo.....	36
Figura 4-18. Comparación de la relación entre largo y ancho según velocidad de rotación.	36
Figura 4-19. Muestras de lechugas por tratamiento: (a) Tratamiento 1, (b) Tratamiento 2, (c) Tratamiento 3.....	37
Figura 4-20. Muestra de tallos con forma "U" invertida de tratamiento T ₃	37
Figura 4-21. Modelo de comportamiento de estatolitos en el sistema hidropónico orbital con ubicación temporal con una velocidad de rotación de 18 rpd.....	38
Figura 4-22. Flujo de caja para periodo de 24 meses.	40
Figura 4-23. Ejemplos de productos y presentación para cultivos de SHIOC.	41
Figura 4-24. Producción mensual de energía eléctrica.	43



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Sergio José Rojas Montero, con cédula de identidad 1-1474-0584, en mi condición de autor del TFG titulado Efecto de variables productivas en un sistema hidropónico orbital computarizado sobre características comerciales de lechuga (Lactuca Sativa L).

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.


FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que en el 2050 la población del planeta aumentará cerca de un 30 % (7,5 millones de personas en el 2017 a 9,7 millones en el 2050), en su mayoría aportado por países menos desarrollados en África, Latinoamérica y el Caribe [1]. El crecimiento de la población causará que el sector agropecuario deba aumentar su producción cerca de un 60 % para satisfacer la demanda alimentaria [2]. Solo un 30 % de la población estará disponible como mano de obra en el sector agrícola reduciendo su capacidad productiva y el 70 % restante habitará en zonas urbanas [3]. Es necesario continuar mejorando las técnicas de producción agrícola y proponer soluciones innovadoras congruentes con la realidad socioeconómica de cada país (p.e. alto grado de urbanización) y el contexto climático para garantizar el acceso al alimento.

El Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) indicó que el calentamiento global posee efectos negativos para los productos agrícolas [4]. El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) en la atmósfera por efecto antropológico es la principal causa del cambio climático. Mayores concentraciones de CO₂ atmosférico tienden a aumentar los rendimientos de las cosechas, pero su efecto positivo se ve mermado por las sequías extendidas, cambios de frecuencia e intensidad de las lluvias y aumentos de eventos climatológicos extremos [5].

La agricultura climáticamente inteligente nace como método para alcanzar las metas propuestas por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y adaptarse al cambio climático. Consiste en aumentar la productividad agrícola de manera sostenible, generar adaptabilidad y resiliencia al cambio climático con una reducción de gases de efecto invernadero [6]. Este enfoque propone ideas que modifican las prácticas agrícolas convencionales a campo abierto o en invernaderos. Sin embargo, por ser sistemas abiertos, están expuestos a otro tipo de fenómenos como la pandemia del COVID-19 declarada el 11 de marzo del 2020 por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que ponen en riesgo el abastecimiento de alimento ya que se comprometen las importaciones y exportaciones de productos e insumos agrícolas, se reduce la capacidad de transporte interno de alimento, se

aumenta las enfermedades y con el fallecimiento de la mano de obra agrícola se puede dar el cierre de aeroempresas [7]. Las fábricas de plantas con luz artificial (PFAL por sus siglas en inglés) son un sistema de producción agrícola cerrado que surgen como un método alternativo de producción que no requiere del uso de agroquímicos fitosanitarios, se puede ubicar en zonas urbanas con menor dependencia del transporte y, por ser sistemas automatizados, requieren de menor mano de obra.

Las PFAL consisten en un edificio modular de múltiples niveles que utiliza tecnología de punta para controlar un sistema agrícola [8]. Todos los factores climatológicos, lumínicos, nutricionales e hídricos son suministrados y controlados de manera artificial, ya que es un sistema completamente cerrado. Debido a que las PFAL son sistemas artificiales, pueden ser incorporados en zonas urbanas, con acceso más inmediato al consumidor final, mejor uso de los recursos y producción durante todo el año. Esta tecnología tiene un alto consumo eléctrico, pero en países como Costa Rica la implementación de paneles solares para producción total o parcial de su consumo eléctrico es viable, dando origen así a una producción más sustentable. Al tener un control sobre los elementos asociados al desarrollo de las plantas se puede generar un producto con mayor grado de consistencia y calidad que las contrapartes abiertas durante todo el año.

Uno de los sistemas de producción para una PFAL consiste en sistemas orbitales con luz artificial. El autor del presente trabajo desarrolló un prototipo de un sistema hidropónico orbital computarizado (SHIOC) [9] como herramienta demostrativa para introducir el concepto y desarrollar estudios para optimizar la productividad agrícola en zonas urbanas. El prototipo consistió en un sistema de cilindros apilados que puede alcanzar teóricamente un aprovechamiento del suelo de hasta siete veces la de métodos convencionales de siembra [10]. Su diseño permite ser usado de manera modular (cada máquina con su propio microclima) para sistemas industriales pequeños o de manera conjunta para sistemas industriales grandes (todas las máquinas tienen el mismo clima). Hasta el momento, el SHIOC se encuentra en etapa de prototipo y requiere de más estudios que lleven el proyecto a un estado comerciable [9].

La presencia de retroalimentación cíclica, casualidad cíclica, impredecibilidad y el hecho de que pequeños cambios alteran ampliamente el sistema, son indicadores de un

sistema complejo [11], los cuales están presentes en SHIOC. El hecho de que el elemento central de producción sea un organismo vivo le infiere un carácter de biocomplejidad donde interactúan factores como la velocidad de la rotación del sistema, el fotoperiodo, la cantidad y calidad de la luz, la temperatura, la humedad relativa, la concentración de CO₂ y las características de la solución nutritiva junto con la dinámica del geotropismo presente al rotar el sistema.

La integración causal entre factores en SHIOC es la clave para que se alcancen niveles de producción que justifique su inversión inicial y coste operativo. Estas interacciones están ampliamente investigadas individualmente [12]–[19], pero la integración entre ellas en un sistema como SHIOC no se comprende totalmente. Además, se debe considerar que a pesar de ser un sistema hidropónico también presenta características de un sistema aeropónico debido al efecto de la rotación: cuando el sustrato sale de la cama de agua y comienza su rotación ocurre un intercambio gaseoso entre el sustrato y el ambiente aumentando los niveles de oxígeno disponible para las raíces con un efecto desconocido sobre la producción en SHIOC.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

El objetivo de esta investigación es determinar la combinación de velocidad de rotación y fotoperiodo del sistema hidropónico orbital computarizado que permitan obtener la mayor producción de biomasa de lechuga (*Lactuca sativa*) en el menor tiempo posible para validar si el sistema hidropónico es un método de producción viable de manera industrializada.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para desarrollar el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- a. Diseñar el sistema de iluminación del sistema hidropónico orbital para determinar su flujo de fotones fotosintéticamente activos.
- b. Determinar la interacción de los parámetros operacionales de fotoperiodo y velocidad de rotación para determinar el efecto sobre la producción de biomasa de producto en función del tiempo.

- c. Comparar el sistema de producción de invernaderos contra el sistema hidropónico orbital computarizado analizando la biomasa producida y la cadena productiva para validar si es una opción de producción que pueda ser adoptada por la industria.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Relación entre cambio climático y la agricultura

El Panel Intergubernamental en Cambio Climático definió el cambio climático como “cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, por efecto de la variabilidad natural o por resultado de las actividades humanas” [20]. Diversos efectos con impacto en el sector agrícola como variaciones en la temperatura y la precipitación se han determinado ampliamente. A estos factores se vinculan otros elementos secundarios como los aumentos en procesos erosivos y la anegación de suelos.

2.1.1 Temperatura

La temperatura juega un rol importante en la producción agrícola ya que las plantas poseen un rango óptimo y específico para su desarrollo. El mayor impacto se da en la producción de granos ya que reduce la habilidad de las plantas para acumular biomasa en los compartimentos comercialmente viables (p.e. el grano) [21]. Algunas simulaciones de producción agrícola bajo escenarios de cambio climático indican que por cada 1 °C de aumento en la temperatura el rendimiento del arroz y del maíz disminuirá cerca de un 9 % en ambos casos [22], y la estimación es que en los próximos 30 – 50 años la temperatura aumente entre 2 – 3 °C [20]. Las temperaturas mínimas tenderán a aumentar generando problemas de brote temprano en frutas como la manzana a costa del rendimiento [23]. El cambio de temperatura alteraría la producción de vegetales y hortalizas debido a que varios de sus procesos fisiológicos y bioquímicos son dependientes de este factor [24].

2.1.2 Políticas hacia el sector agrícola

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) propuso los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para que los países miembros los implementen generando temáticas de trabajo como el objetivo 2: “Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible”, el objetivo 12: “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” y el 13: “Adoptar medidas urgentes para combatir al cambio climático y sus efectos” [25]. Estos tres objetivos presionan al sector agrícola al solicitarle aumentar la producción alimentaria, con modelos de producción sostenible y de

bajo impacto ambiental. El sector agrícola genera el 24 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [26].

2.1.3 Producción de alimento en las ciudades

Debido al aumento de la población que ocurrirá en las ciudades y a la reducción de los suelos agrícolas mencionados en la sección 1, es necesario introducir nuevas tecnologías de producción. Una alternativa es la producción de alimento por medio de agricultura vertical en ciudades. Este método es un sistema cerrado en donde todos los factores que influyen en el sistema son monitoreados y controlados [26].

Una de las primeras vinculaciones realizadas entre la agricultura vertical y su implementación en ciudades fue realizada por la empresa MVRDV en el año 2000 con el proyecto “Pig City” en Holanda. Se propuso el uso de torres verticales autosustentables donde en los niveles superiores existe una producción vegetal y de hongos, en el nivel intermedio se da producción pecuaria, a nivel de suelo se ubica el matadero que procesa la producción pecuaria. Los residuos son utilizados para producir bioenergía que abastece a la torre [10].

Producir alimento en ciudades por medio de la agricultura vertical tiene ciertas ventajas como el hecho de que se reduce la cantidad de energía utilizada en el transporte del producto al estar más cerca la oferta de la demanda. Debido a que la cadena de distribución es más corta, el desperdicio de alimento durante su transcurso se reduce y el producto llega más fresco al consumidor. Dependiendo de la técnica de producción utilizada se puede adquirir alimento producido sin pesticidas, con una vida de anaquel más larga y de alta calidad [3].

2.2 Fábricas de plantas con luz artificial

Las PFAL son una alternativa para producción de alimento en ciudades ya que utilizan un modelo de agricultura vertical el cual aumenta el rendimiento por área al aprovechar una tercera dimensión (altura). Son sistemas cerrados y artificiales de producción agrícola en que todas las variables que afectan el desarrollo de un cultivo son controladas por medio de sistemas automatizados. Las PFAL han demostrado ser técnicamente y

económicamente factibles, ya que obtienen volúmenes de producción entre 20 a 30 veces más que los existentes en sistemas abiertos a un costo razonable [27].

2.2.1 La estructura de una PFAL

Las PFAL son sistemas completamente cerrados y artificiales, por ello es necesario abastecer el sistema de elementos básicos para la producción de biomasa, tal y como se muestra en la Figura 2-1, donde la luz, CO₂, fertilizantes, semillas, agua, calor y recurso humano son utilizados para generar biomasa.

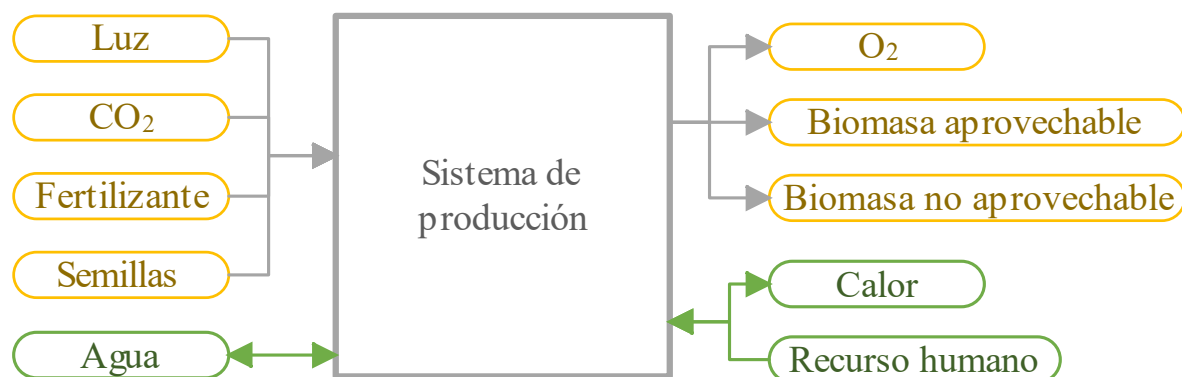


Figura 2-1. Recursos esenciales para producción en una PFAL. Modificado de [3].

Los flujos energéticos y másicos del sistema se muestran en la Figura 2-2, donde la energía es suministrada como electricidad al sistema. La energía eléctrica es transformada en energía lumínica y térmica para suplir las necesidades de las plantas, también es transformada en energía mecánica para el movimiento del agua y la biomasa. El balance de masa y energía permite comprender las interacciones que ocurren a diferentes niveles en el sistema de producción, ya que es un parámetro de diseño en las PFAL. En esta figura también se visualiza la interacción entre los tres componentes vivos: plantas, peces y hongos. La interacción entre seres vivos puede ser utilizada para crear un sistema biológico inducido por medios artificiales con el fin de producir alimento.

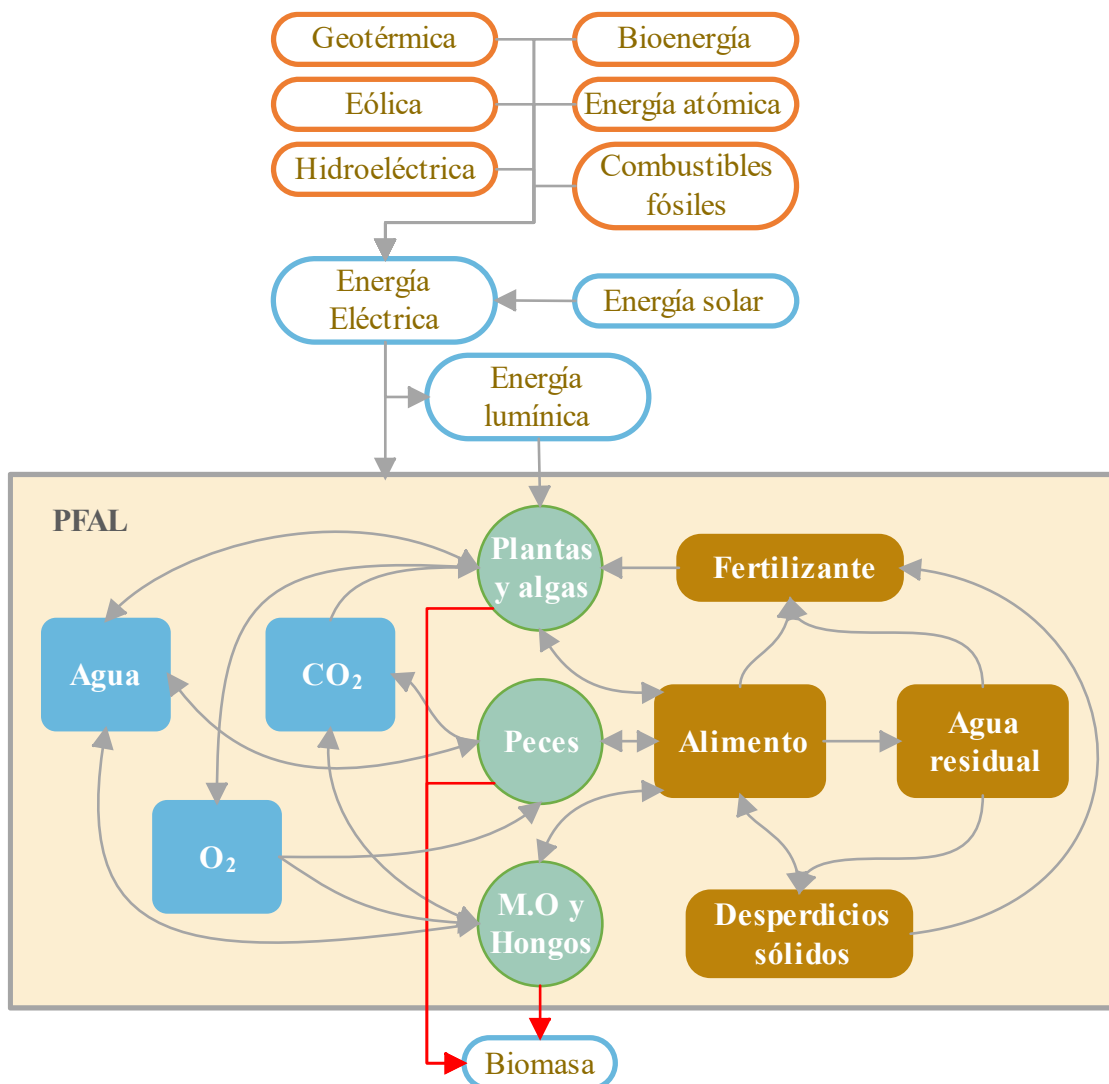


Figura 2-2. Flujos energéticos y másicos en sistemas de PFAL. Modificado de [3].

2.2.2 Ejemplos de implementación

La Figura 2-3-a muestra la fábrica de hortalizas (como albahaca y lechuga) Green Sense Farms ubicada en Indianápolis, Estados Unidos; su sistema de producción vertical con utilización de luz artificial de diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés) (Figura 2-3-b). La Figura 2-4-a muestra la fábrica de plantas Spread Co., Ltd ubicada en Kioto, Japón la cual utiliza luz fluorescente como sistema de iluminación artificial (Figura 2-4-b). Ambos casos poseen sistemas de dosificación de CO₂, control de temperatura y humedad relativa (HR).



Figura 2-3. (a) Fábrica de plantas Green Sense Farms, (b) Sistema de producción de Green Sense Farms, Fuente: [28].



Figura 2-4. (a) Fábrica de plantas Spread Co., Ltd, (b) Sistema de producción de Spread Co., Fuente: [29].

2.2.3 PFAL como sistemas complejos

Los parámetros importantes que deben ser monitoreados y controlados en una PFAL para producción de biomasa incluyen aspectos agronómicos, ambientales y tecnológicos como los mostrados en la Tabla 2-1. Cada uno de los factores por sí solos no determinan si el rendimiento será óptimo. La interdependencia e interacción entre ellos es lo que domina el comportamiento del sistema. Consecuentemente, las PFAL deben ser consideradas y estudiadas como biosistemas complejos para lograr su optimización y una mayor producción.

Tabla 2-1. Parámetros de monitoreo en una PFAL

Número	Parámetro
1	Temperatura
2	Humedad relativa
3	Conductividad eléctrica de la solución nutritiva
4	Fotoperiodo
5	Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPDF por sus siglas en inglés)
6	Concentración de CO ₂
7	Tipo de luz artificial
8	Composición de la luz artificial
9	Composición de solución nutritiva
10	Tipo de sustrato
11	pH de la solución nutritiva
12	Tipo de planta

2.2.4 Métodos de producción en fábricas de plantas

Dentro de los métodos de producción en las PFAL existen los sistemas columnares, cilíndricos y camas apiladas (Figura 2-5), siendo las camas apiladas el más utilizado [10]. Los cilindros apilados son los que mejor aprovechan el espacio y la luz, pero son los más complejos biológica e ingenierilmente. El método de producción se asocia a la forma en que una PFAL opera, así como la logística de suministro de recursos como agua, nutrientes, semillas, capital humano, capacidad de automatización e incluso el tipo de materia prima disponible para la construcción de los equipos productivos lo que causa que cada implementación sea diferente.

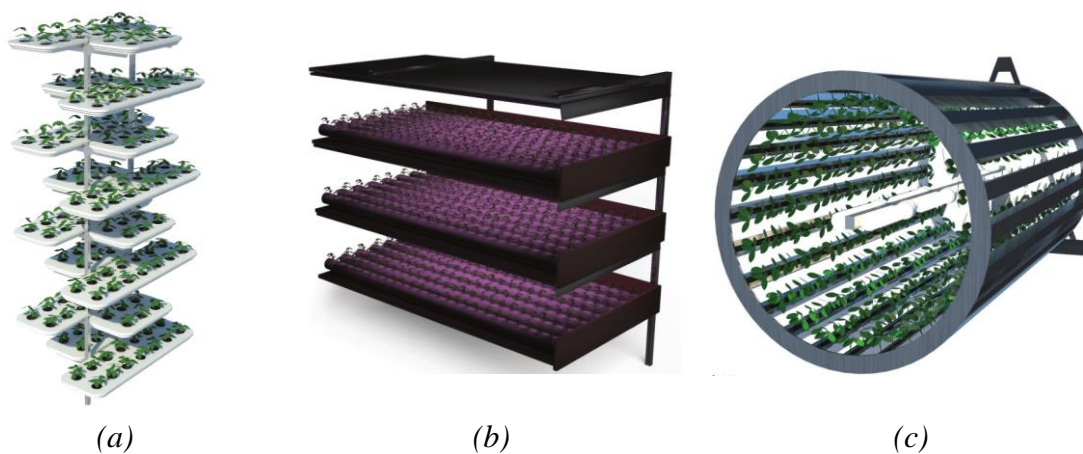


Figura 2-5. Tipos de sistemas de producción en PFALs. a) sistema columnar, b) camas apiladas, c) cilindros apilados. Fuente: [10].

Existen diferencias en cada método de producción. Los sistemas columnares utilizan generalmente una mezcla de luz natural con suplementación artificial, y tienden a generar sombra sobre los niveles inferiores. Las camas apiladas son de fácil manejo y mantenimiento, pero poseen la desventaja de que los bordes experimentan condiciones diferentes al centro de la cama. Esto es conocido como “efecto de borde”, donde la radiación recibida por la luz es menor en los bordes debido a la disposición geométrica del sistema [30]. Los cilindros apilados presentan menor variación en ese sentido por lo que son ideales desde el punto de vista de máximo uso de los recursos.

El sistema hidropónico orbital computarizado (SHIOC) es considerado un sistema de cilindros apilados. Fue diseñado y construido con el propósito de explorar la implementación de esta tecnología en Costa Rica acorde a la materia prima disponible en el mercado nacional [9]. La Figura 2-6 muestra el prototipo experimental desarrollado en el año 2018. El sistema está separado del exterior por medio de un aislante térmico que también bloquea la luz externa. Tiene una capacidad de retener hasta 100 hortalizas de hasta 30 cm de alto.

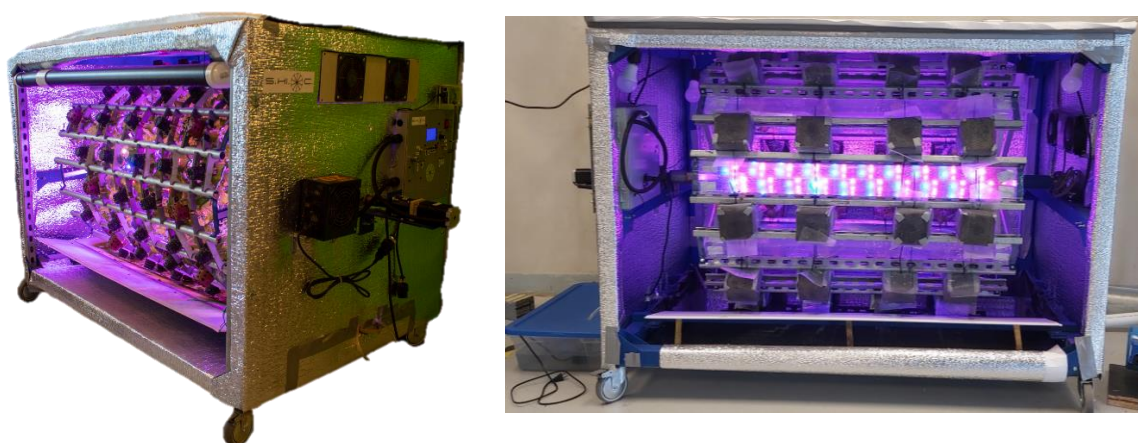


Figura 2-6. Prototipo experimental de SHIOC. Fuente: [9].

El SHIOC está compuesto por un marco externo, un marco orbital, una fuente de luz artificial, un motor eléctrico y un panel de control (Figura 2-7). El panel de control se encarga de regular los ciclos de funcionamiento de la luz artificial, la velocidad de rotación, la dosificación de agua y la regulación de temperatura. El sistema tiene la capacidad de ser conectado a internet, ser controlado de manera remota y reportar el estado del equipo en tiempo real a un servidor [9].

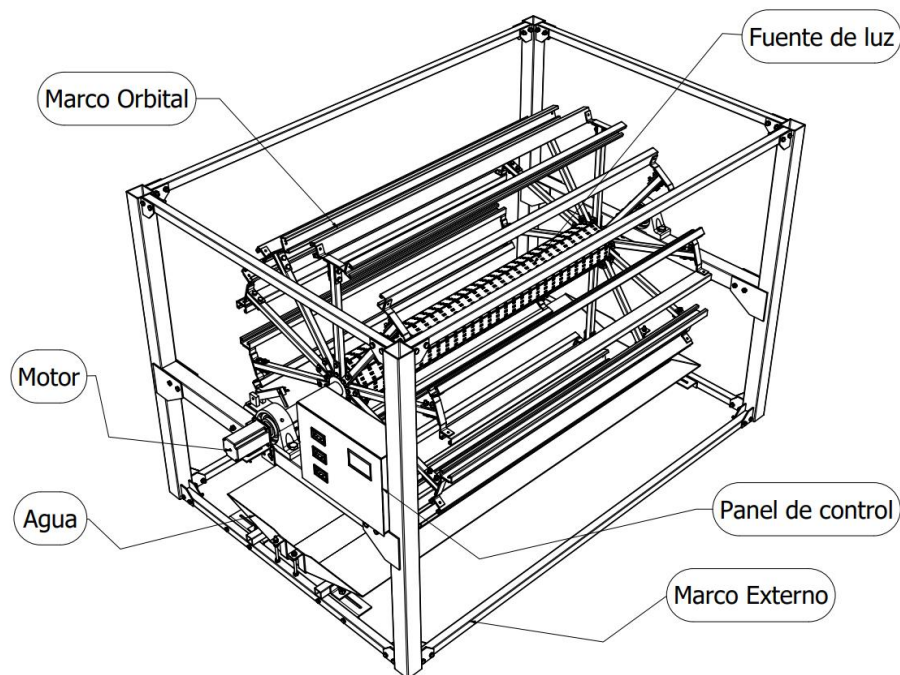


Figura 2-7. Componentes de SHIOC. Fuente: (8).

El sistema tiene el potencial de implementarse de manera industrial al colocar una máquina encima de otra, hasta una altura máxima de 8 m, como se muestra en la Figura 2-8. Para que el SHIOC se implemente de esta manera se deben utilizar sistemas de control climático que gobiernen todo el cuarto de cultivo y se debe aislar todo el ecosistema antropogénico del ambiente externo. En casos de producciones más pequeñas se puede utilizar la máquina con su material aislante y el control climático se puede realizar de manera individual. Bajo la configuración industrial mostrada en la Figura 2-8 se puede cultivar 35 200 plantas en un espacio de 360 m² [9].

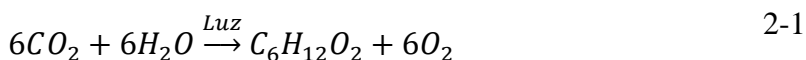


Figura 2-8. Propuesta de uso de SHIOC de manera industrial Fuente: [9].

2.3 Luz artificial en sistemas hidropónicos.

La luz proveniente de diodos emisores de luz o LED por sus siglas en inglés (light emitting diode) en las PFAL son la fuente de energía que utilizan las plantas para fotosintetizar. La luz se define como una combinación de ondas eléctricas y magnéticas que oscilan perpendicularmente entre si a través del espacio con las propiedades de longitud de onda, frecuencia y velocidad. En la fotosíntesis la región de mayor importancia, conocida como radiación fotosintéticamente activa o PAR por sus siglas en inglés (photosynthetic active radiation), es la longitud de onda de 400 a 700 nm[31]. Los fotones son el modelo cuántico que describe a la luz y se definen como partículas elementales que tiene las propiedades de velocidad, energía, momento lineal y momento angular. No obstante, otras propiedades de la luz pueden ser mejor interpretadas desde el punto de vista de las ondas [32].

La fotosíntesis es un proceso de reducción que consiste en transformar el dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno utilizando la luz como energía para el desarrollo de reacciones fotoquímicas, como se observa en la ecuación 2-1. Esto ocurre en los cloroplastos, los cuales son organelas únicas de doble membrana con tamaño variable. La membrana interna conforma sacos denominados tilacoides donde se alojan los pigmentos, fotosistemas, cadena de transporte de electrones y enzimas que realizan las reacciones fotoquímicas [33]. En el Fotosistema II ocurre la separación del agua que libera $4H^+$, O_2 y $4e^-$. Posteriormente estos electrones son reducidos por el Fotosistema I para sintetizar NADPH. El ATP y el poder reductor (NADPH) producido por las reacciones luminosas de la fotosíntesis son utilizados para reducir el CO_2 en forma de carbohidrato por medio del ciclo de Calvin en las reacciones del carbono de la fotosíntesis [34].



Los pigmentos conforman antenas cosechadoras de luz que conducen la energía de los fotones dentro de los Fotosistemas I y II. Las plantas poseen los pigmentos de Clorofila a, Clorofila b y Carotenoides [31]. La Figura 2-9 muestra los rangos de longitud que absorben los diferentes pigmentos y su eficiencia relativa en la fotosíntesis para cada longitud de onda.

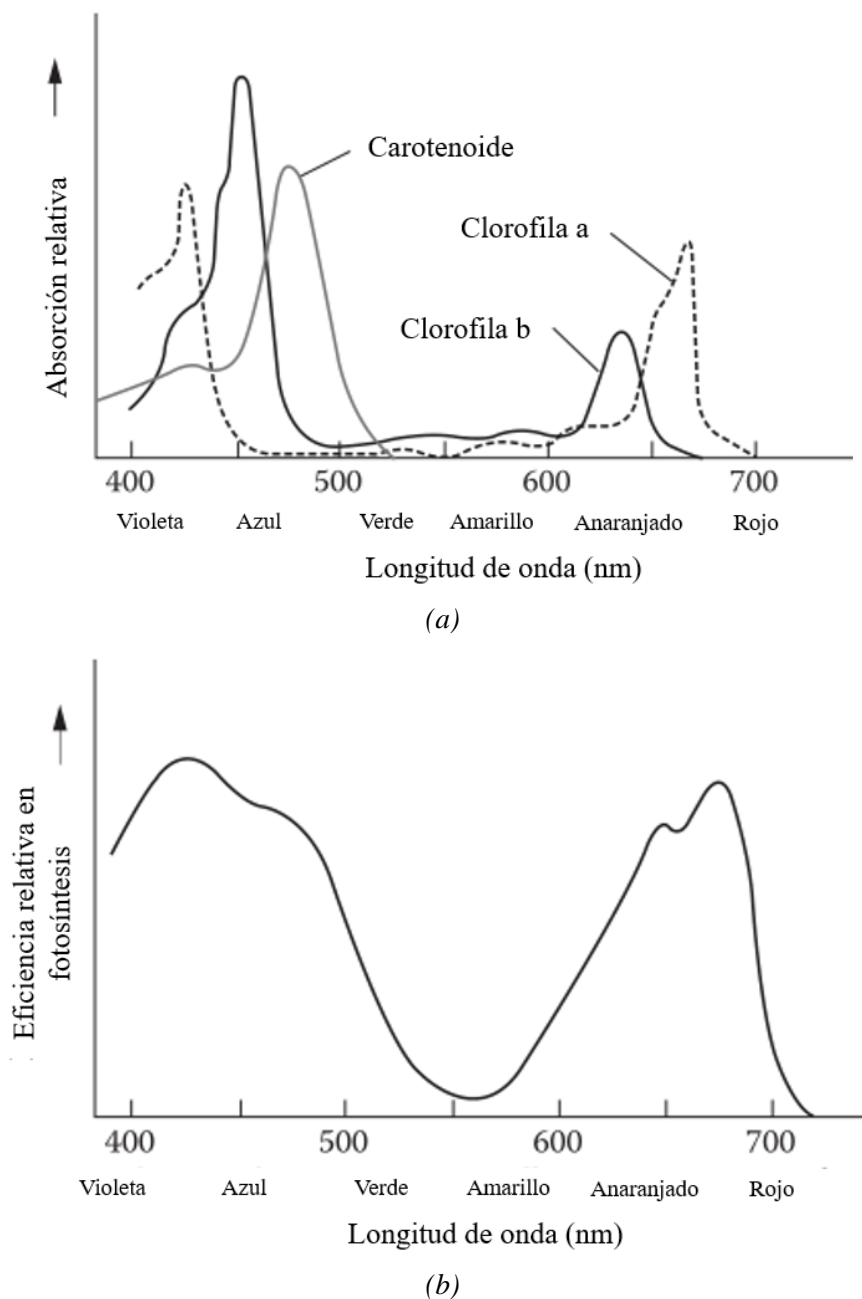


Figura 2-9. (a) Absorción relativa de luz visible para pigmentos de plantas según la longitud de onda. (b) Eficiencia relativa en fotosíntesis según la longitud de onda. Fuente: [35].

Los LED son utilizados como fuente lumínica en una amplia gama de industrias debido a su alta eficiencia y su constante incremento en eficiencia, que han incrementado su capacidad de 166 lm/W en el año 2020, hasta algunos modelos que producen 242 lm/W en el año 2022 (OSCONIQ S 5050), y se espera que en el 2025 se alcance 250 lm/W [36]; siendo así la fuente más eficiente de luz eléctrica en este momento.

Ya que el desarrollo de las plantas se ve afectado por la calidad y ciclo de la luz, los LED constituyen una oportunidad para controlar parcialmente la morfogénesis y la producción de metabolitos secundarios [30] debido a la amplia gama de colores, configuraciones geométricas, poca emisión de calor y eficiencia energética.

Los LED son un semiconductor conformado por un material tipo P- y otro tipo N-. Entre estos dos materiales se ubica la interfaz que dependiendo del tipo de material genera colores diferentes al aplicar una corriente eléctrica [37]. Los materiales tipo P- son los que tienen una deficiencia de electrones debido a un enlace molecular cuando se forma un cristal, los tipos N- tienen un exceso de electrones. Los LED producen una longitud de onda dentro de un rango estrecho y no una longitud de onda exacta (es decir, los LED son cuasi monocromáticos) [38].

Debido a la versatilidad y control sobre las longitudes de onda que producen los LED es necesario considerar ciertos aspectos para su uso eficiente como fuente de luz en las PFAL. Uno de estos parámetros es la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos, conocido como PPF por sus siglas en inglés (photosynthetic photon flux density), el cual es medido en $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y está asociado a la longitud de onda de la luz, intensidad y distribución espacial. El segundo aspecto es la calidad de la luz que está asociada a su espectro lumínico (longitudes de onda). Finalmente, se debe considerar el fotoperiodo, que consiste en los ciclos de luz y oscuridad que se van a emplear. Este parámetro se asocia a la integral de luz diaria o DLI por sus siglas en inglés (daily light integral) que matemáticamente corresponde al PPDF multiplicado por el fotoperiodo. El conjunto de estos parámetros se conoce como receta lumínica y debe ser seleccionada según el tipo de cultivo, distribución de espacio, energía disponible y costo. Cada uno de estos parámetros y la interacción entre ellos son temas actuales de investigación.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño del sistema de iluminación y caracterización

El sistema de iluminación está compuesto por 40 % de luces LED rojas (640 nm), 40 % de luces LED azules (470 nm) y 20 % de luces LED blancas. Estos porcentajes han sido seleccionados debido a que se ha demostrado resultados favorables en el desarrollo de plantas en sistemas hidropónicos con luz artificial [39]. Se requiere que la iluminación pueda ser ensamblada en el eje de rotación del marco orbital, ser resistente al agua, operar a 12 V, contar con un PPFD de entre $220 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y ser simétrico.

Se determinó el PPFD a lo largo del riel en donde se ubican las plantas (a 30 cm perpendicularmente de la fuente de luz) a intervalos de 10 cm y en ángulos de rotación de 0° , 90° , 180° y 270° , para un total de 40 mediciones realizadas con el adquisidor de datos LI-1400 del fabricante LI-COR (Nebraska, EE.UU.) y un sensor cuántico LI-190. Este apartado responde al objetivo específico a.

3.2 Caracterización del proceso de producción en SHIOC

Esta sección presenta la metodología necesaria para desarrollar el objetivo específico 2 del proyecto y consta de varios elementos para caracterizar el comportamiento del proceso productivo de SHIOC, siendo la determinación de la velocidad de rotación, el diseño experimental y el análisis estadístico sus componentes básicos.

3.2.1 Determinación de la velocidad de rotación

Se realizó una prueba para determinar el tiempo que tardan los contenedores en detener el goteo cuando son extraídos del contenedor de agua y así poder determinar la velocidad de rotación máxima del equipo. Se utilizaron contenedores plásticos de 5 cm de diámetro y 7 cm de largo llenos de un sustrato hidropónico a base de lana de roca (Figura 3-1). Diez contenedores fueron colocados en un riel del SHIOC y sumergidos en la cama de agua durante un periodo de 30 minutos para asegurar que llegaran al nivel de saturación. Posteriormente, el riel fue girado 90° y se midió el tiempo hasta no observar goteo en ningún contenedor durante al menos 30 segundos. Con el tiempo obtenido se determinó la velocidad de rotación que se debe utilizar como máximo, denominada como V_1 . Esto se debe a que es

necesario proteger el sistema de iluminación de daño por agua debido al goteo. La velocidad de rotación V_2 se determinó como la mitad de V_1 .



Figura 3-1. (a) Contenedor plástico y (b) lana de roca dentro del contenedor.

El control de la velocidad se realizó por medio de un controlador de motor de pasos modelo TB6600 que operó un motor de paso Nema 23 de 3 A, con un torque de 3 N·m, conectado a una reductora planetaria con relación 1:25. El controlador recibe pulsos en intervalos constantes para realizar un paso del motor, por lo que se utilizó la ecuación 3-1 para determinar las milésimas de segundo que hay entre pulsos para alcanzar la velocidad deseada (en revoluciones por día).

$$T_{inv} = \left(RPD \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \cdot R_v \cdot \frac{200 \text{ pulsos}}{\text{rev}} \right)^{-1} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ ms}}{1 \text{ s}} \quad 3-1$$

en donde RPD es la velocidad en revoluciones por día deseada y R_v corresponde a la relación de velocidad de la unidad reductora (en este caso 25).

3.2.2 Diseño experimental y variables de respuesta

El diseño experimental consideró las variables de velocidad de rotación y fotoperiodo como variables independientes para el modelo. La velocidad de rotación se determinó según el apartado 3.2.1. Los fotoperiodos de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad (F_1) fueron seleccionados ya que estos han resultado exitosos en sistemas hidropónicos con luz artificial se ha destinados a la producción de biomasa [30], [40], [41]. Como segundo tratamiento lumínico se utilizó el fotoperiodo de 8 horas luz y 16 horas oscuridad (F_2), esto con el fin de reducir a la mitad la energía consumida por el sistema. Estos fotoperiodos fueron controlados por un microcontrolador ESP-8266 con un reloj digital modelo DS1307. Se utilizó una

solución hidropónica nutritiva mayor y menor marca EverGreen preparada según las indicaciones del fabricante su composición química se observa en el anexo 8.1 y 8.2, la recarga de los tanques de agua se realizaba los días Lunes, Miércoles y Viernes. Las dimensiones del sistema hidropónico se pueden apreciar en los planos adjuntos en el Anexo 8.4, la lista de materiales y detalles de construcción pueden ser consultados en la tesis “Diseño de un sistema hidropónico orbital como alternativa de producción de alimento de alta intensidad en zonas urbanas” de este autor [9].

Las variables de respuesta fueron la masa de la lechuga (M), la relación entre el ancho y largo de cada hoja (R-LA) que se obtiene dividiendo la distancia de la sección más angosta de la hoja entre la distancia desde el tallo de la hoja su extremo distal (cómo se muestra en la ecuación 3-2) y el número de hojas. Estos datos se recolectaron de todas las lechugas de cada tratamiento.

$$R - LA = L/A \quad 3-2$$

La Tabla 3-1 muestra el resumen de los tratamientos. Cada tratamiento consistió en el crecimiento de 100 lechugas en el SHIOC durante 30 días. Las lechugas se adquirieron germinadas en bandejas de 200 plántulas de un proveedor local (VillaPlants, ubicado Aguas Calientes de Cartago, Costa Rica). De cada bandeja se seleccionan 100 plántulas para ser trasplantadas a SHIOC y se seleccionan 30 al azar para ser caracterizadas y obtener las condiciones iniciales.

Tabla 3-1. Resumen de tratamientos experimentales.

Tratamiento	Velocidad de rotación	Fotoperiodo
T ₁	V ₁	F ₂
T ₂	V ₁	F ₁
T ₃	V ₂	F ₁
T ₄	V ₂	F ₂

V₁ = velocidad máxima de rotación

V₂ = 0,5·V₁

F₁ = 16 horas luz / 8 horas oscuridad

F₂ = 8 horas luz / 16 horas oscuridad

3.2.3 Análisis estadístico

El análisis se realizó en el programa informático R (versión 4.2.1) [42], con el compilador Python y la biblioteca Scipy (versión 1.9.0) [43].

El análisis se dividió en dos fases, con la primera enfocada en determinar el posible efecto de borde que el sistema pudiera imponer sobre las variables independientes y la mortalidad de las plantas. Para ello se realizó una comparación entre las plantas del centro del sistema (n=60) y las del borde (n=40) para cada uno de los tratamientos por medio de pruebas t-Student para cada variable dependiente.

La segunda fase analizó el efecto de la velocidad de rotación y del fotoperiodo sobre las variables productivas de respuesta. Lo anterior se llevó a cabo con el fin de detectar cuales factores son los que más influyen en el sistema por medio de un análisis multivariante de varianza (MANOVA) de dos vías, seguido de análisis de varianza (ANOVA) de dos vías por variable dependiente y el correspondiente análisis *post-hoc* cuando fuera necesario. Previo a realizar el MANOVA, se verificó que los datos cumplieran con las siguientes características: i) normalidad multivariada, ii) homogeneidad de las matrices de varianza y covarianza, multicolinealidad, linealidad y iii) ausencia de valores atípicos multivariados (verificado por las distancias de Mahalanobis). Este apartado generó los resultados necesarios del segundo objetivo específico.

3.3 Viabilidad industrial

Se comparó el sistema hidropónico orbital contra sistemas de producción tradicional establecidos con el fin de determinar si producir alimento de manera industrial en sistemas SHIOC es viable. Para la comparación, se determinó la cantidad de energía utilizada para producir un gramo fresco de lechuga por metro cuadro en SHIOC. Posteriormente, se analizaron las ventajas y desventajas del sistema SHIOC que tienen injerencia sobre la calidad del producto y con impacto en el mercado. Este apartado responde al objetivo específico b.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Sistema de iluminación LED

Se utilizó una platina de aluminio de 3,8 cm de ancho y 98 cm de largo como base para cada barra de luces. Se utilizaron luces LED como las mostradas en la Figura 4-1, con su respectivo disipador de aluminio. La Tabla 4-1 muestra las especificaciones técnicas y cantidad de LED utilizados.



Figura 4-1. LED utilizados y sus disipadores de calor.

Tabla 4-1. Características técnicas de los LED.

Potencia (W)	Color	Cantidad	Corriente (mA)	Voltaje (V)	Flujo luminoso (LM)	Ángulo
1	Rojo (620-625nm)	200	260-350	2,2-2,4	40-50	120°
1	Azul (460-470nm)	200	260-350	3,2-3,4	25-30	120°
1	Blanco	60	260-350	3,2-3,4	100-110	120°
3	Blanco	30	520-700	3,2-3,6	200-220	120°

Se crearon dos tipos de barras LED (según se muestra en Tabla 4-2), cada tipo estuvo compuesto por módulos conectados en paralelo, de los cuales existieron tres tipos. El primer módulo (M_1) estuvo compuesto por dos LED rojos, dos LED azules y una resistencia de 3Ω (potencia máxima de $1/2 \text{ W}$) conectados en serie. El segundo módulo (M_2) correspondió a tres LED blancos de 1 W y una resistencia de $6,8 \Omega$ (con una potencia máxima de 1 W) conectados en serie. El tercer módulo (M_3) estuvo conformado por tres LED blancos de 3 W y una resistencia de $3,3 \Omega$ (potencia máxima de 2 W) conectados en serie. El sistema de iluminación está compuesto por 10 barras de tipo 1 y 10 barras de tipo 2 colocadas de manera

intercalada. La potencia total del sistema de iluminación es de 532 W. Al usar un área superficial efectiva ($2,2 \text{ m}^2$) del marco orbital se determinó que el sistema opera con $241,81 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Tabla 4-2. Composición de los lotes de las barras LED

Tipo Barra	Potencia	Cantidad de barras	Módulos de la barra	Cantidad de módulos	Potencia del módulo	Porcentaje del total de potencia
1	29,26W	10	M1 (Rojo, Azul)	6	3,66W	75%
			M2 (Blanco 1W)	2	3,65W	25%
2	23,92W	10	M1 (Rojo, Azul)	4	3,66W	61%
			M3 (Blanco 3W)	1	9,28W	39%

Los módulos se unieron a la platina de aluminio por medio de un pegamento epóxico resistente al agua y las uniones eléctricas se sellaron con silicona de resistencia a altas temperaturas. La Figura 4-2 muestra un ejemplo de una barra terminada con sus respectivos módulos y el patrón de luces seleccionado. Se utilizó este patrón para asegurar que la distribución de la luz fuera lo más homogénea posible (geométricamente). Los módulos, al ser conectados en paralelo, presentan el inconveniente de que aumentan el amperaje del sistema por lo que es necesario usar cables de menor calibre y se presenta una limitante térmica ya que se registran temperaturas más altas según la corriente que fluye por ellos. Sin embargo, se prefirió esto debido a que si un módulo falla no compromete toda la barra LED. En la Figura 4-3 se puede observar las barras LED instaladas en el sistema hidropónico orbital y su funcionamiento.

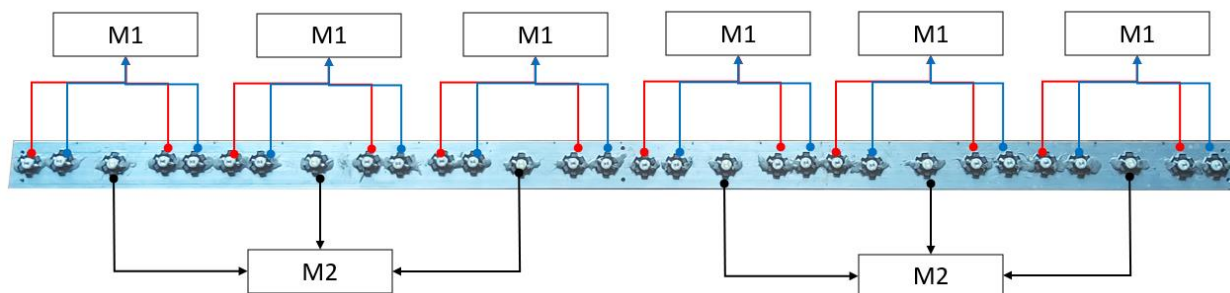


Figura 4-2. Modelo de barra LED del tipo 1 con el diagrama de los módulos y configuración de colores.



Figura 4-3. Sistema de iluminación de SHIOC.

La Figura 4-4 muestra la distribución espacial del PPFD (densidad del flujo de fotones fotosintéticos) dentro del marco orbital y el histograma del PPFD. La medición mínima fue de $174,4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y la máxima de $270,4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. La mayoría de las mediciones del PPFD son en el rango de $240 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a $260 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, con una desviación estándar de $29,12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, lo que satisface el criterio planteado en la sección 3.1. Se puede observar que en los bordes del sistema (longitud 5 cm y 95 cm) ocurrió una disminución del PPFD, es un fenómeno conocido como efecto borde y ocurre porque estas secciones se ven expuestas a una cantidad menor de LED. Entre los 15 y los 85 cm es donde se concentra el PPFD superior a $220 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Es importante destacar que en sistemas de camas apiladas (ver Figura 2-5) el efecto de borde se presenta en cuatro ubicaciones (los cuatro bordes de la cama), pero en el SHIOC ocurre solo en dos, lo cual es una de las grandes noblezas de esta tecnología ya que minimiza el efecto a la mitad del número de bordes.

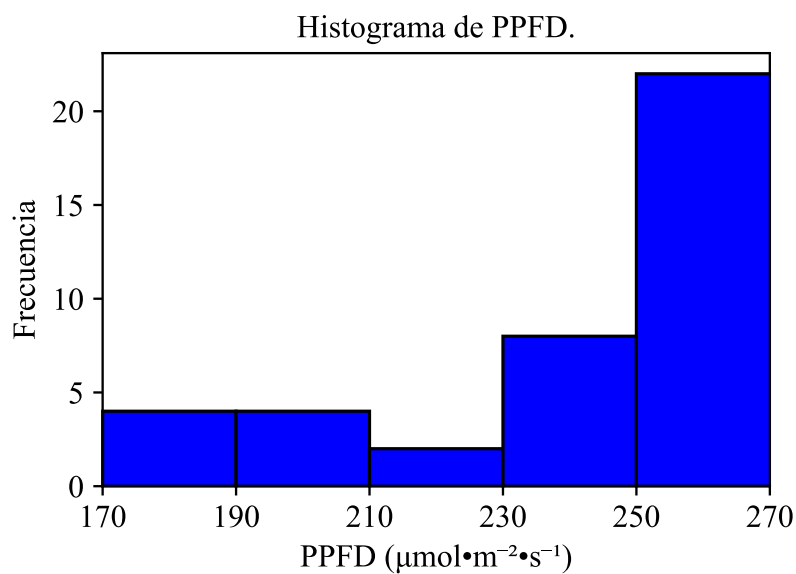
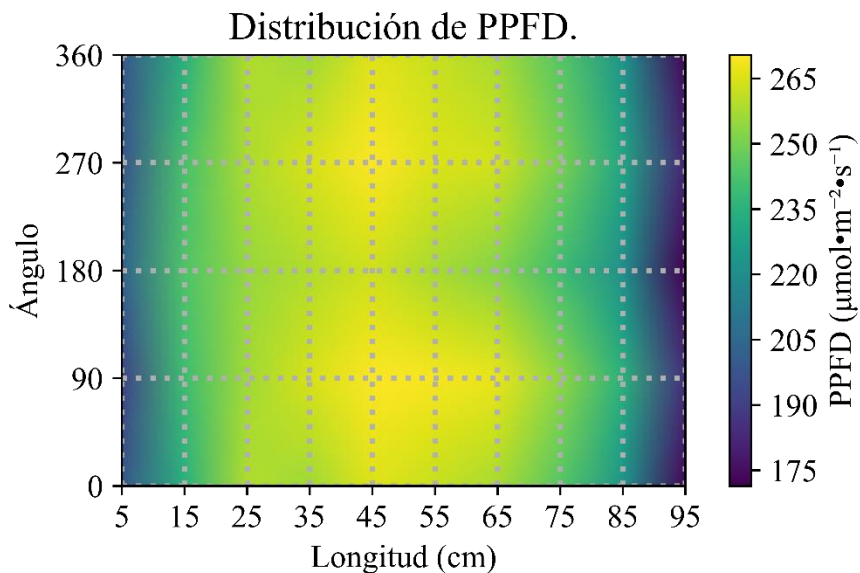


Figura 4-4. (a) Distribución espacial e (b) histograma de frecuencias del PPFD.

4.2 Interacción entre fotoperiodo y velocidad de rotación

4.2.1 Determinación de la velocidad de rotación

Se determinó que el tiempo mínimo que se debe esperar para que los contenedores no goteen es de 10 minutos. Esto implicó que, en 10 minutos, el sistema como máximo debe girar 90° , lo que corresponde a una revolución cada 40 minutos. Con esta información se

logró determinar la velocidad máxima de rotación por medio de la ecuación 4-1. Al utilizar la relación $V_2 = \frac{V_1}{2}$ se determinó que $V_2 = 18 \text{ rpd}$ (revoluciones por día).

$$V_1 = \frac{1 \text{ rev}}{40 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 36 \text{ rpd} \quad 4-1$$

Para estimar el intervalo de tiempo entre pulsos necesarios para que el controlador opere el motor de paso se utilizó la ecuación 3-1 y para una velocidad de 36 rpd se requiere un intervalo entre pulsos de 480 ms. En el caso de 18 rpd tal intervalo corresponde a 960 ms.

4.2.2 Caracterización de las condiciones iniciales

Las condiciones iniciales de cada tratamiento se resumieron en la Tabla 4-3. Con respecto a la masa entre condiciones iniciales los datos sugirieron que el lote del tratamiento T1 tenía plántulas de menor tamaño y el T4 las de mayor tamaño. Para el R-LA se generó una línea base entre 1,90 y 2,35 para establecer un punto de partida de medición de calidad de las lechugas. Estas plantas fueron colocadas dentro de SHIOC como se muestra en la Figura 4-5.

Tabla 4-3. Resumen de condiciones iniciales.

Variable	Estadístico	Iniciales T1	Iniciales T2	Iniciales T3	Iniciales T4
Masa (g)	Mínimo	1,0	0,9	0,8	1,5
	Máximo	2,6	2,1	2,0	2,8
	Sumatoria	20,1	50,2	42,9	65,8
	Promedio	1,73	1,67	1,43	2,19
	Desviación estándar	0,35	0,28	0,31	0,35
Número de hojas	Mínimo	3	3	3	3
	Máximo	4	5	5	5
	Mayor frecuencia	4	4	3	5
R-LA (cm/cm)	Mínimo	1,59	1,84	1,65	1,50
	Máximo	2,34	2,49	3,11	2,43
	Promedio	1,90	2,08	2,35	1,81
	Desviación estándar	0,17	0,18	0,38	0,21

T1 = 36 rpd y fotoperiodo de 8 horas
 T2 = 36 rpd y fotoperiodo de 16 horas
 T3 = 18 rpd y fotoperiodo de 16 horas
 T4 = 18 rpd y fotoperiodo de 8 horas



Figura 4-5. Lechugas trasplantadas al sistema hidropónico orbital en el primer día.

4.2.3 Análisis del efecto de borde

La Tabla 4-4 resume los resultados obtenidos y la Tabla 4-5 presenta los resultados de las pruebas t-Student para verificar si existieron diferencias entre los centros y los bordes de cada tratamiento. No se presentaron resultados del tratamiento T₄ puesto que después de siete días de trasplantadas, el 90% de las plantas murieron y el experimento se concluyó, las posibles causas de esto se explicarán posteriormente (ver el final de la sección 4.2.5). Los datos sugirieron que existen diferencias de masa para cada tratamiento entre las posiciones de los centros y los bordes. Sin embargo, con respecto al R-LA solo se mostró diferencia en el tercer tratamiento. Adicionalmente T₃ también mostró la mayor diferencia de mortalidad entre centro y borde (30,7%) de los tres grupos. En general, los centros estuvieron asociados con masas promedio mayores que sus respectivos bordes, corroborando que el efecto de borde está presente de forma análoga a la distribución del PPFd de la Figura 4-4.

Tabla 4-4. Resumen de los bordes y centros para cada tratamiento.

Variable	Estadístico	T ₁		T ₂		T ₃	
		Centro	Borde	Centro	Borde	Centro	Borde
Mortalidad (%)	-	11,7	32,5	1,7	5,0	6,7	37,5
Masa (g)	Mínimo	5,9	3,9	4,5	6,8	3,0	5,6
	Máximo	20,3	20,1	59,5	48,9	44,1	27,8
	Sumatoria	707,5	255,9	1730,0	868,0	1227,4	363,6
	Promedio	13,3	9,4	29,3	22,8	21,9	14,5
	Desviación estándar	3,41	3,6	12,6	9,9	9,2	5,8
Número de hojas	Mínimo	5	3	4	5	5	5
	Máximo	10	8	15	14	15	12
	Mayor frecuencia	7	5	10	9	9	7
R-LA (cm/cm)	Mínimo	1,6	1,4	1,4	1,5	1,2	1,4
	Máximo	2,7	2,3	2,1	2,0	1,9	1,9
	Promedio	1,9	1,9	1,7	1,7	1,5	1,6
	Desviación estándar	0,17	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabla 4-5. Resultados de varianza y prueba t-Student entre bordes y centros.

Variable	Prueba	Estadístico	T ₁	T ₂	T ₃
Masa	Varianza Levene	p (misma varianza)	0,735964	0,138609	0,035988**
	t - Student	p (misma media)	<0,05*	<0,05*	<0,05*+
R-LA	Varianza Levene	p (misma varianza)	0,264848	0,270371	0,908132
	t - Student	p (misma media)	0,348022	0,067605	0,05*

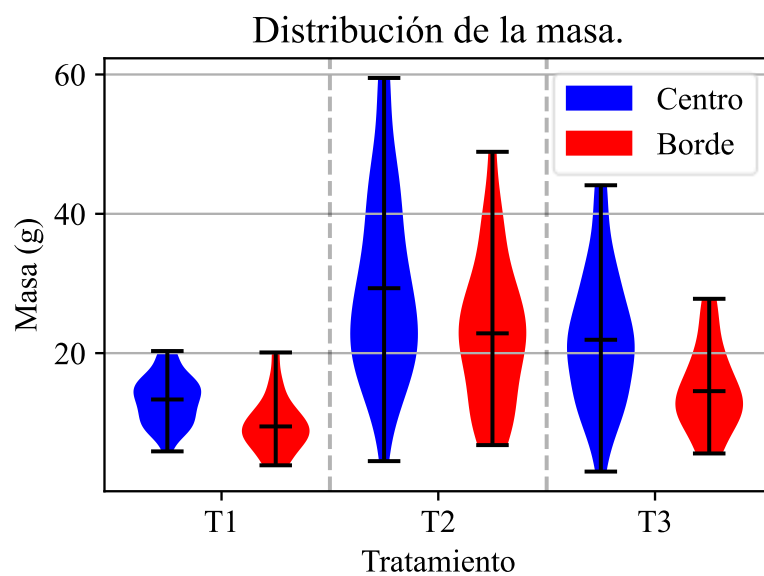
* Se presentaron diferencias significativas entre tratamientos.

**Se presentó diferente varianza entre muestras.

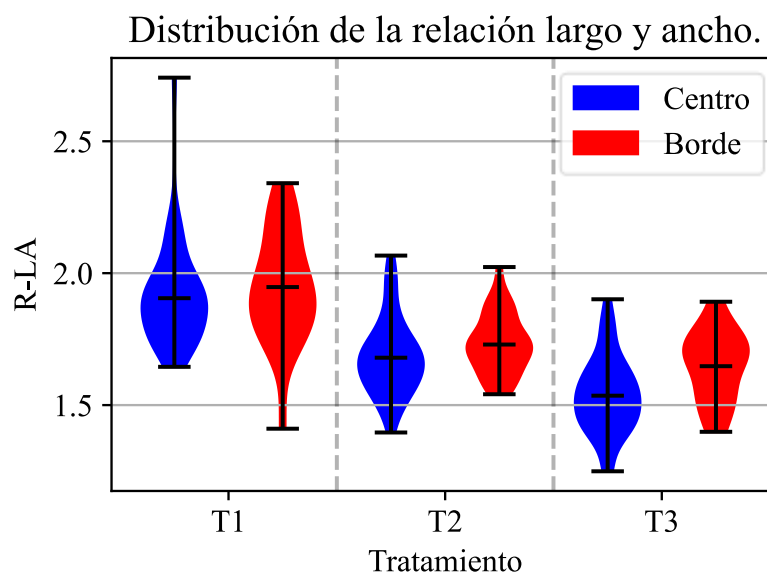
+ Correspondió a una prueba t de Welch debido a que Levene indica que la varianza entre muestras es diferente.

La distribución de la masa y el R-LA de los bordes y los centros según tratamiento se muestran en la Figura 4-6. Con respecto a la masa se pudo observar que para cada tratamiento los bordes y centros presentaron comportamientos significativamente diferentes, según las pruebas de t-Student. Para los tres tratamientos se apreció que el centro tuvo una mejor producción de biomasa que los bordes. Con respecto al R-LA se logró apreciar la diferencia en el tratamiento T₃ detectada en la prueba t-Student. Es importante notar (Figura 4-6-b) la concentración de los datos del tratamiento T₂, específicamente en el rango entre 1,5 y 1,8 en contraste con el tratamiento T₁ que tiende a estar por encima de 1,8. Lo anterior es un indicador de calidad de la hoja directamente asociado a la calidad de la receta lumínica. El tratamiento T₁ tendió a generar un R-LA alto ya que las hojas tienden a alongarse en búsqueda

de luz lo que genera plantas de menor masa. Esto seguramente estuvo vinculado con la deficiencia lumínica en ese caso.



(a)



(b)

Figura 4-6. (a) Distribución de masa y (b) R-LA según ubicación y tratamiento.

La Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9 muestran el comportamiento de la cantidad de hojas para el centro y el borde de T₁, T₂ y T₃ respectivamente. Se aprecia que en los bordes el número de hojas tiende a ser menor en comparación con el centro debido a que el PPFD en los bordes es menor (Figura 4-4-a). El tratamiento T₂ es el que tuvo el mayor número de

hojas en el centro, seguido por T₃. Como ambos tratamientos tienen el mismo fotoperiodo, tal resultado sugiere que la velocidad de 18rpd tiende a disminuir la cantidad de hojas. El tratamiento T₁ es el que tuvo menor número de hojas debido a que experimentó un fotoperiodo de solo 8 h de luz y esto redujo la cantidad de energía disponible para realizar la fotosíntesis disminuyendo su capacidad para generar biomasa [44].

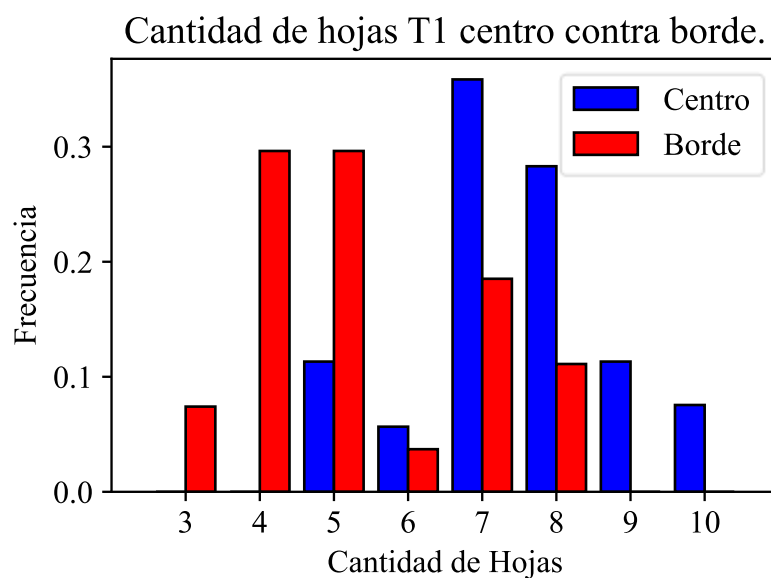


Figura 4-7. Histograma de hojas del centro contra borde de T₁.

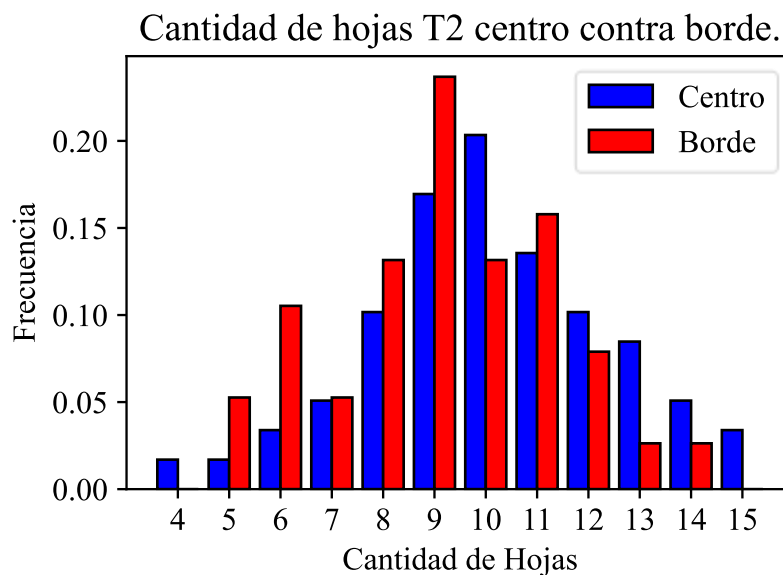
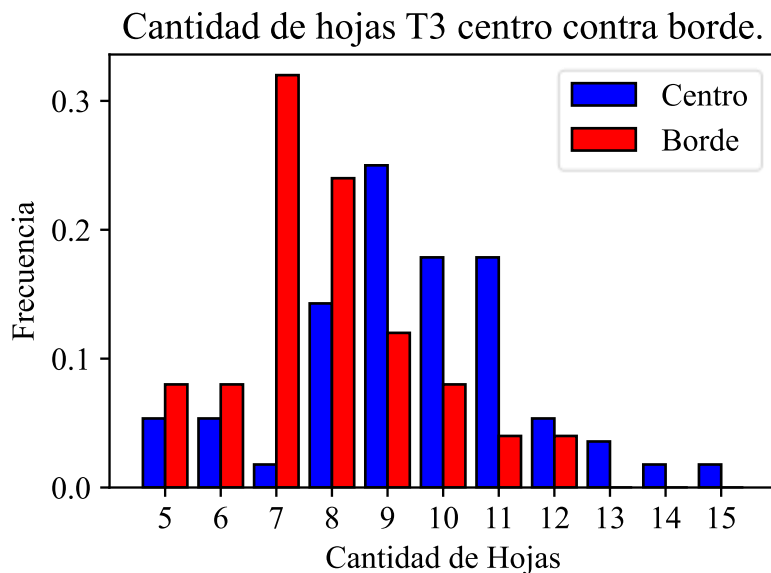


Figura 4-8. Histograma de hojas del centro contra borde de T₂.



2

Figura 4-9. Histograma de hojas del centro contra borde de T₃.

Con respecto a la mortalidad, la diferencia (Tabla 4-4) más alta se observó en el tratamiento T₃ seguido por el tratamiento T₁ y luego T₂. Esto sugiere que una velocidad de rotación baja y un bajo fotoperiodo aumentaron la mortalidad dentro de SHIOC.

Se realizó una prueba t-Student entre el borde del tratamiento T₂ y el borde del T₃ con el fin de verificar si la velocidad de rotación incidió sobre la masa y la R-LA. Ambos tratamientos tuvieron al mismo fotoperiodo, pero diferente fue velocidad de rotación. Para la prueba se concluyó que existen diferencias significativas tanto en la masa ($p=0,000476$, con prueba t-Welch) como en R-LA ($p=2,3618E-07$).

La información recolectada sugirió que el efecto borde está presente en el sistema y afectó las tres variables cuantificadas. Lo anterior es un indicador de las noblezas de los cilindros apilados ya que por su geometría solo se presentan dos bordes, mientras que en sistemas de camas apiladas siempre existirán cuatro. Un sistema de cilindro apilados como SHIOC ofrecerá una producción más homogénea que uno de camas apiladas. La comparación de los bordes de los tratamientos T₂ y T₃ sugirió que existe alguna relación entre el efecto borde y la velocidad de rotación.

4.2.4 Comparación de condiciones iniciales y finales por tratamiento.

La Tabla 4-6 muestra el resumen de los datos recolectados para cada tratamiento y la Figura 4-10, Figura 4-11, Figura 4-12 muestra la distribución de la masa, relación ancho y

largo y cantidad de hojas respectivamente. Se destaca que el tratamiento T₂ presentó la menor mortalidad y la mayor cantidad de masa producida.

Tabla 4-6. Resumen de datos recolectados para cada tratamiento.

Variable	Estadístico	T ₁	T ₂	T ₃
Mortalidad (%)	-	20,0	3,0	19,0
Masa (g)	Mínimo	3,9	4,5	3,0
	Máximo	20,3	59,5	44,1
	Sumatoria	963,4	2598,0	1591,0
	Promedio	12,0	26,8	19,6
	Desviación estándar	3,93	12,01	8,97
Número de hojas	Mínimo	3	4	5
	Máximo	10	15	15
	Mayor frecuencia	7	9	9
R-LA (cm/cm)	Mínimo	1,4	1,4	1,2
	Máximo	2,7	2,1	1,9
	Promedio	1,9	1,7	1,6
	Desviación estándar	0,19	0,13	0,14

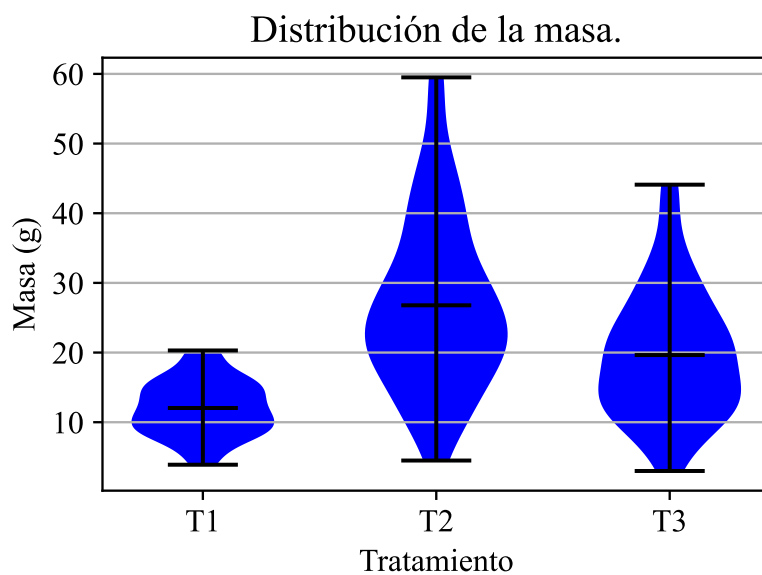


Figura 4-10. Distribución de la masa según tratamiento.

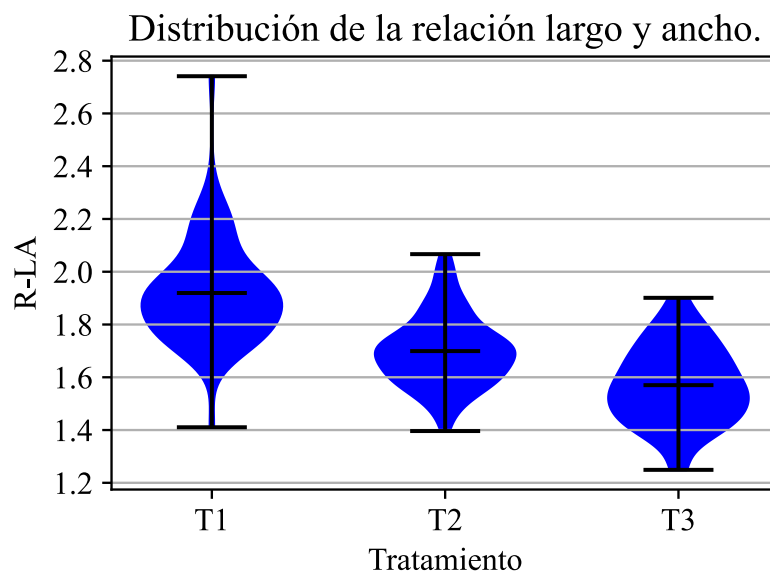


Figura 4-11. Distribución de la relación largo y ancho según tratamiento.

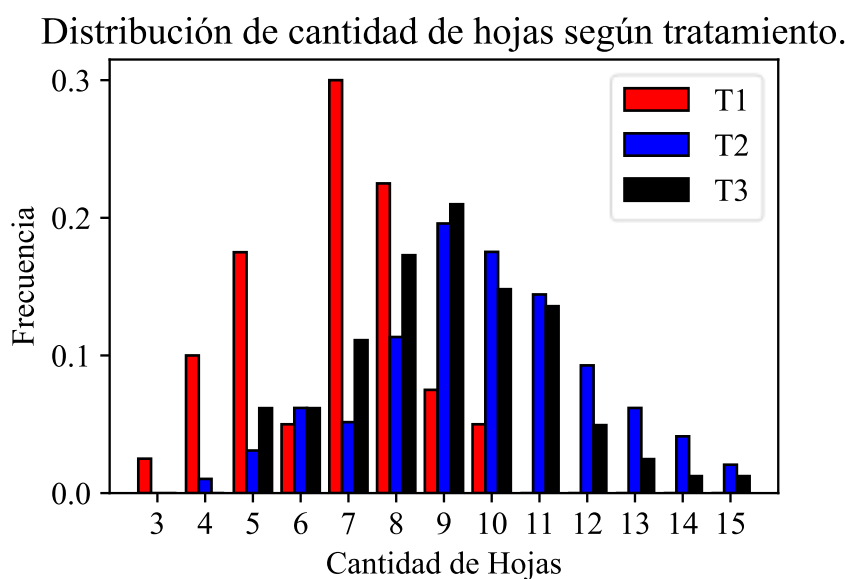


Figura 4-12. Histograma de cantidad hojas según tratamiento.

Comparando contra los datos iniciales (ver Tabla 4-3) se observó que las plantas de T₁, T₂ y T₃ crecieron un promedio de 605,9%, 1504,8% y 1270,6%, respectivamente. La Figura 4-13 muestra la distribución de los tratamientos en sus condiciones iniciales y finales para la masa donde se observa cómo los tres tratamientos comenzaron con una masa promedio de 1g por planta y cómo después de cada tratamiento la masa subió. La Figura 4-14 muestra el comportamiento para R-LA y se observa que los tres tratamientos comenzaron en diferentes posiciones probablemente debido a la variabilidad natural asociada con el

crecimiento de las plantas. Los tratamientos T₂ y T₃ redujeron la R-LA, lo cual no se observó en el T₁.

Condiciones iniciales y finales por tratamiento para la masa.

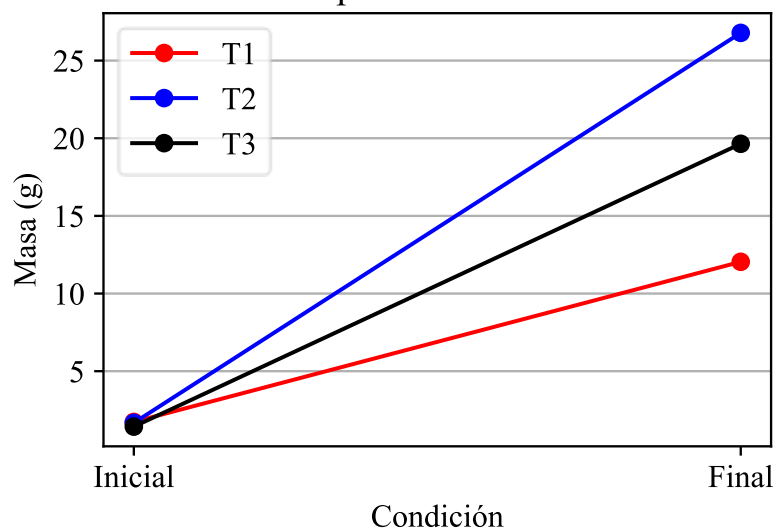


Figura 4-13. Masa inicial y final según tratamiento.

Condiciones iniciales y finales por tratamiento para la relación largo y ancho.

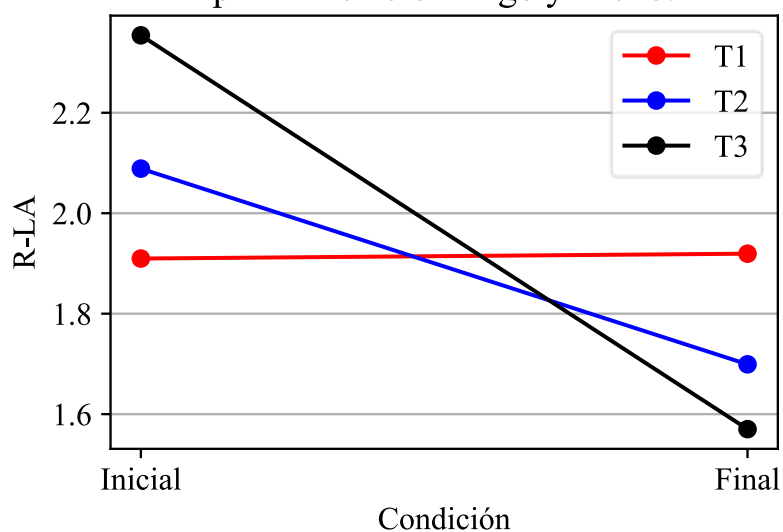


Figura 4-14. Relación entre largo y ancho inicial y final según tratamiento.

4.2.5 Análisis del efecto de fotoperiodo y la velocidad de rotación.

A partir del análisis de Mahalanobis se detectaron tres valores atípicos dentro de la población. La Tabla 4-7 muestra los resultados del análisis de multicolinealidad, ausente en

este caso, pues los valores ajenos a la diagonal de la matriz son diferentes de uno. En el caso de la normalidad multivariada se aplicó el teorema del límite central multivariado, ya que el muestreo para cada combinación de variables independientes y dependientes fue mayor a 30, por lo que se asumió que hay normalidad multivariada. La Figura 4-15 muestra los resultados de la homogeneidad de las matrices de varianza y covarianza y la linealidad, donde se aprecia que la gran mayoría de datos se ubican entre -2 y 2 tanto para los valores estandarizados como ajustados, por lo que determinó que se cumple con este criterio. Con respecto a la linealidad se aprecia (Figura 4-15-b) que en los extremos tiende a perderse, pero la mayoría tiene un comportamiento deseado por lo que se asumió que también se cumplió con este criterio. Esta información sugiere que los datos son apropiados para ser usados en el MANOVA y ANOVA.

Tabla 4-7. Matriz de multicolinealidad.

	Masa	R-LA
Masa	1,000000	0,619527
R-LA	0,619527	1,000000

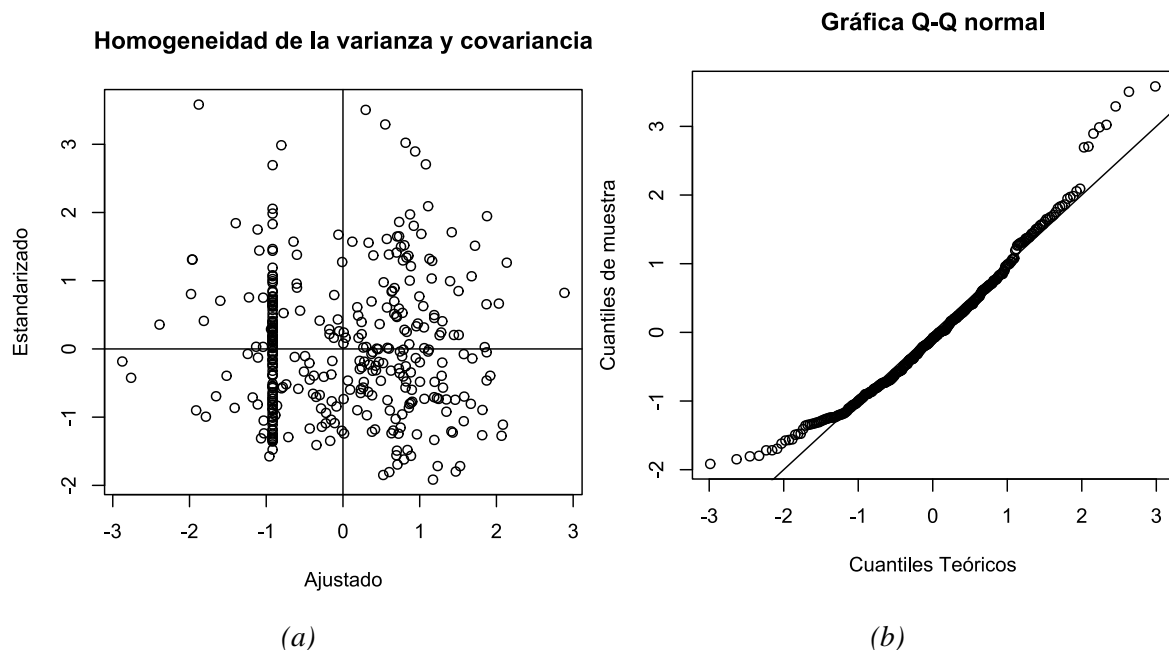


Figura 4-15. (a) Análisis de homogeneidad de la varianza y covarianza y (b) linealidad.

La Tabla 4-8 muestra los resultados obtenidos para el MANOVA de dos vías para las variables dependientes de masa y R-LA. Los datos sugieren que tanto el fotoperiodo, la

velocidad de rotación y la interacción de estos dos parámetros tuvieron efectos significativos sobre la masa y la R-LA de manera conjunta.

Tabla 4-8. Resultados de MANOVA

	Prueba	Grados de libertad	Estadístico de prueba	F aproximado	Grados libertad del Modelo	Grados de libertad del denominador	Pr(>F)	
Fotoperiodo	Pillai	1	0,925194	2164,385	2	350	2,22E-19	***
	Wilks	1	0,074806	2164,385	2	350	2,22E-19	***
	Hotelling-Lawley	1	12,367914	2164,385	2	350	2,22E-19	***
	Roy	1	12,367914	2164,385	2	350	2,22E-19	***
Velocidad	Pillai	1	0,954578	3677,772	2	350	2,22E-19	***
	Wilks	1	0,045422	3677,772	2	350	2,22E-19	***
	Hotelling-Lawley	1	21,015842	3677,772	2	350	2,22E-19	***
	Roy	1	21,015842	3677,772	2	350	2,22E-19	***
Fotoperiodo Velocidad	Pillai	1	0,935283	2529,094	2	350	2,22E-19	***
	Wilks	1	0,064717	2529,094	2	350	2,22E-19	***
	Hotelling-Lawley	1	14,446766	2529,094	2	350	2,22E-19	***
	Roy	1	14,446766	2529,094	2	350	2,22E-19	***

Códigos de significancia: 0: `***`, 0,001: `**`, 0,01: `*`, 0,05: `.` , 0,1: ` `

Se procedió a realizar un ANOVA de dos vías (tipo III) para determinar el efecto de las variables independientes sobre la masa y la R-LA (Tabla 4-9). Los datos sugirieron que tanto el fotoperiodo, la velocidad y la interacción entre ambas variables tuvieron un efecto significativo sobre la masa y R-LA. La masa se vio más influenciada por el fotoperiodo y R-LA por la velocidad.

Tabla 4-9. Resultados de ANOVA de dos vías.

Variab	Variables Dependientes	Variables Independientes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor F	Pr(>F)	
Masa		Fotoperiodo	24464,774	1	468,529	1,31E-66	***
		Velocidad	7249,818	1	138,842	3,13E-27	***
		Interacción	772,075	1	14,786	1,42E-04	***
R-LA		Fotoperiodo	40,396	1	2331,282	4,55E-157	***
		Velocidad	92,759	1	5353,171	1,35E-214	***
		Interacción	70,038	1	4041,947	1,10E-194	***

Códigos de significancia: 0: `***`, 0,001: `**`, 0,01: `*`, 0,05: `.` , 0,1: ` `

Dado que el tratamiento T4 no pudo mantener a las plantas vivas se decidió eliminar este grupo de datos y realizar ANOVAS de una vía para mejorar la percepción del efecto del fotoperiodo y la velocidad sobre la masa y R-LA, los resultados de estos ANOVAS se presentan en la Tabla 4-10. Los datos sugieren que la masa se vio afectada por el fotoperiodo y R-LA se vio afectada por el fotoperiodo y la velocidad.

Tabla 4-10. Resultados de ANOVAS de una vía.

Variable Independiente	Variable Dependiente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Valor F	Pr(>F)	
Fotoperiodo	Masa	6504,876	1	82,469	3,15E-17	***
	R-LA	4,211	1	155,090	4,37E-28	***
Velocidad	Masa	1,988	1	0,019	8,90E-1	
	R-LA	3,008	1	94,268	3,79E-19	***

Códigos de significancia: 0: `***`, 0,001: `**`, 0,01: `*`, 0,05: `.` , 0,1: `.`

Tomando lo anterior en consideración y la Figura 4-16 se puede observar que el fotoperiodo de 16 h tendió a aumentar la masa promedio de las plantas. Este resultado era esperado pues las plantas tienen más energía disponible para realizar el proceso fotosintético. La Figura 4-17 muestra que R-LA aumentó con el tratamiento de 8 h. Con respecto a la velocidad se aprecia en la Figura 4-18 que el tratamiento de 18 rpd tendió a un R-LA más bajo que respecto al de 36 rpd.

Comparación entre fotoperiodos para masa

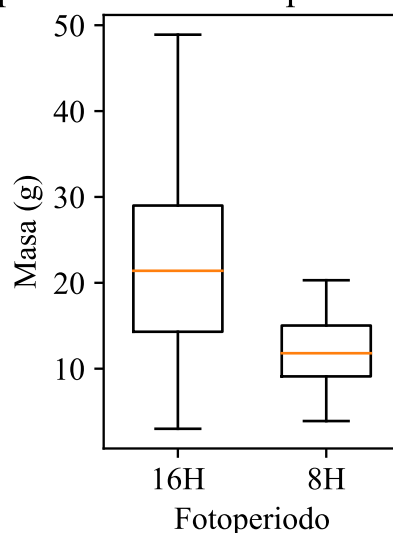


Figura 4-16. Comparación de masa según fotoperiodo.

Comparación entre fotoperiodos para R-LA

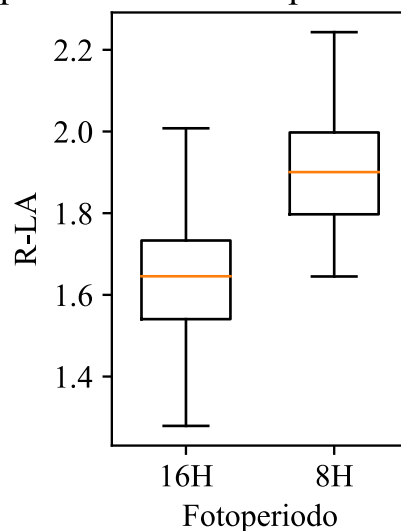


Figura 4-17. Comparación de relación entre largo y ancho según fotoperiodo.

Comparación entre velocidades para R-LA

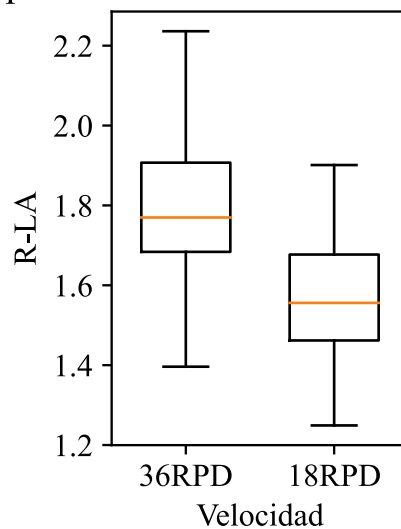


Figura 4-18. Comparación de la relación entre largo y ancho según velocidad de rotación.

La Figura 4-19 muestra una lechuga seleccionada al azar de cada tratamiento. Se observa que el tratamiento T₃ presenta un tallo en forma de “U” invertida lo que lo vuelve inviable para su comercialización, la Figura 4-20 presenta los tallos con mayor detalle. Este fenómeno se presentó en un 98% de las plantas que sobrevivieron el tratamiento. Esto no se observó en T₁ y T₂. Lo observado sugiere que la velocidad de 18 rpd incide sobre el fenómeno de gravitropismo de la planta, el cual consiste en que la dirección del crecimiento está directamente influenciada por el vector de gravedad. Esto ocurre porque las plantas poseen

células especializadas llamadas estatocistos que contiene en su interior granos de almidón sedimentables llamados estatolitos. Los estatolitos responden a la gravedad cómo si se tratara de un fluido semilíquido cuya presión sobre las paredes genera una señal que es transducida creando una respuesta de alargamiento direccionado en el tallo [33].

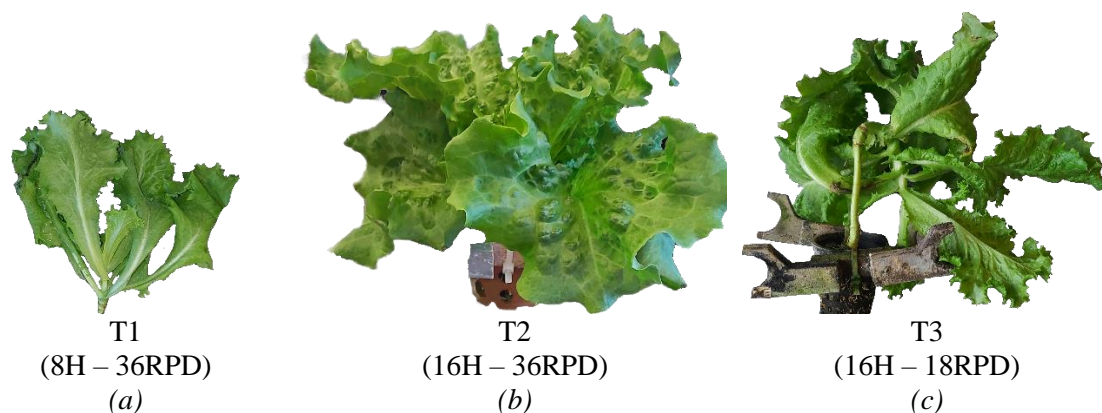


Figura 4-19. Muestras de lechugas por tratamiento: (a) Tratamiento 1, (b) Tratamiento 2, (c) Tratamiento 3



Figura 4-20. Muestra de tallos con forma "U" invertida de tratamiento T₃.

Analizando el comportamiento de los estatolitos (asumiendo que se comportan cómo un fluido) a lo largo del cada ciclo de rotación tendrían un comportamiento semejante al de la Figura 4-21 en donde los estatolitos se representan por un óvalo amarillo y las plantas por un rectángulo donde el borde rojo representa el lado derecho de la planta, el azul el lado izquierdo y el tiempo que dura en alcanzar esa posición a 18 rpd. Se puede observar cómo los estatolitos se depositan en zonas diferentes de la planta lo que envía una señal de estímulo variable según su posición en el sistema hidropónico orbital. La posición de la planta está en

función del tiempo y su velocidad. En este caso, una planta tarda 80 minutos en completar un giro, si la velocidad es de 36 rpd tarda 40 minutos, esto indica que la señal de los estatolitos oscila en un intervalo de 80 minutos (18 rpd) o 40 minutos (36 rpd). Dado que solo a 18 rpd se observó la forma de “U” invertida en el tallo sugiere que hay un efecto temporal que permite una manifestación del gravitropismo, sin embargo, las rutas espaciotemporales de las señales que actúan en el gravitropismo desde su creación hasta el momento donde se manifiesta en un movimiento permanecen en gran medida desconocidas [45].

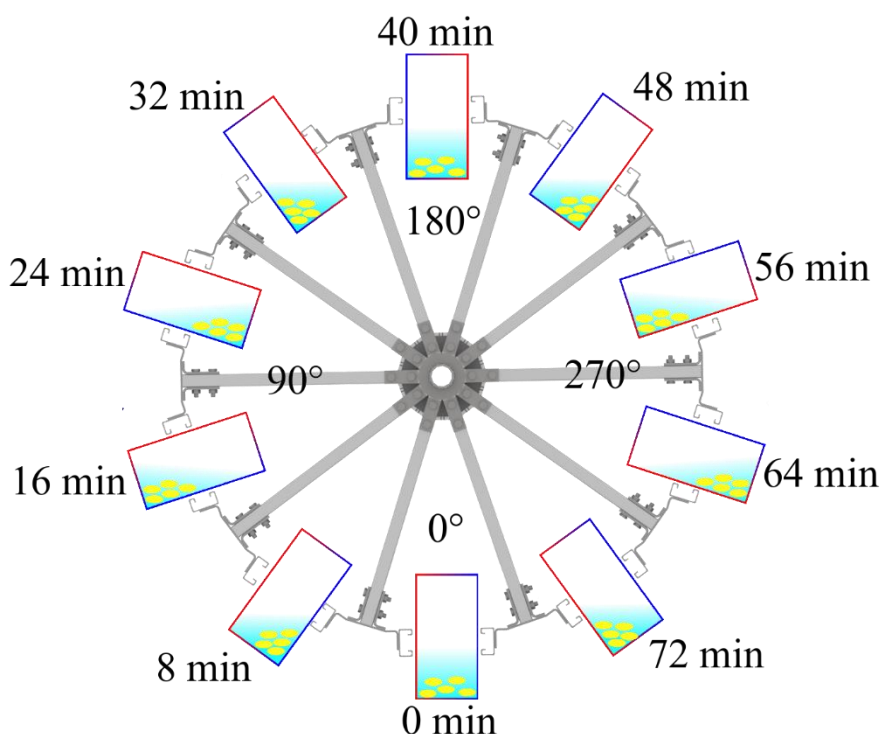


Figura 4-21. Modelo de comportamiento de estatolitos en el sistema hidropónico orbital con ubicación temporal con una velocidad de rotación de 18 rpd.

Se ha observado que para el trigo desde el momento en que se presenta un estímulo de gravitropismo hasta el momento en que se observa un cambio en la dirección del tallo hay un intervalo de ~20 min y dependiendo de la duración del estímulo se manifiesta en semejante media la inclinación del tallo a pesar de que el estímulo había concluido, lo que indica que existe cierto tipo de memoria dentro del sistema tornándolo más complejo [46]. Considerando lo anterior se plantea la hipótesis de que en el sistema hidropónico orbital a una velocidad de 18 rpd el efecto se manifiesta ya que tarda 40 minutos en pasar de la posición 0° a 180° (cómo se aprecia en la Figura 4-21) lo que le da amplio tiempo a la planta

para reaccionar y manifestar una inclinación en el tallo. Esto no ocurre con una velocidad de 36 rpd pues de 0° a 180° tarda 20 minutos y en este punto comienza a percibir una señal contraria de gravitropismo (de 180° a 0°) contrarrestando el efecto anterior. La combinación del dinamismo del gravitropismo observado a 18rpd en combinación con el fotoperiodo de 8h (el cual reduce considerablemente la masa) genera un entorno de alto estrés para la planta tornándolo incompatible para que estas se desarrollen, explicando así el motivo por el cual en el tratamiento T₄ murió la mayoría.

4.3 Viabilidad industrial

Uno de los elementos más relevantes para la implementación de SHIOC a nivel industrial es el consumo energético. La Tabla 4-11 muestra el consumo eléctrico de los diferentes sistemas de SHIOC. Debido a que el consumo del control maestro, la bomba de agua y el motor es constante (basado en el modelo actual de SHIOC) a lo largo de los tratamientos se pueden considerar como un costo fijo. El consumo energético de la luz LED es el de mayor importancia debido a que tiene el mayor costo y se asocia directamente al desarrollo de las plantas.

Tabla 4-11. Potencia y consumo energético de SHIOC mensual.

Sistema	Potencia (W)	Horas de uso mensual	Energía (kWh)
Control maestro	1	720	0,72
Bomba de agua	5	180	0,90
Motor	30	720	21,6
Iluminación LED (16h)*	530	480	254,40
Iluminación LED (8h)*	530	240	127,20

* La iluminación es variable según el tipo de tratamiento

Se ha determinado que el punto de quiebre financiero del sistema ocurre a los nueve meses de iniciada la operación con una tasa interna de retorno del 8% [9] como se observa en el flujo de caja de la Figura 4-22 con un precio de venta de cabeza de lechuga de \$1,85. Mejoras implementadas en esta investigación como el uso de rieles de aluminio, densificación de la producción, mejor técnica de producción y rediseño del sistema de control permite reducir los costos mejorando los análisis financieros previamente realizados.

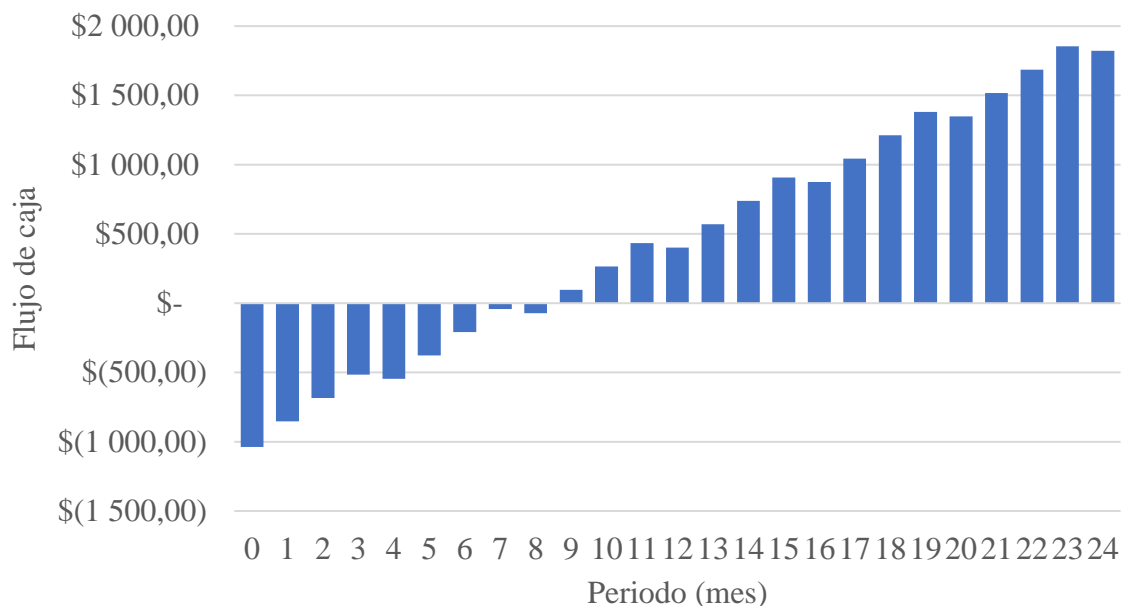


Figura 4-22. Flujo de caja para periodo de 24 meses.

Fuente:[9]

La Tabla 4-12 muestra el consumo energético de cada tratamiento y el rendimiento para transformar la energía eléctrica del sistema de iluminación en biomasa aprovechable. Se puede observar que el tratamiento T₃ consume la misma energía que el T₂ y presenta el menor rendimiento por lo tanto no es deseable para producción. El tratamiento T₂ tiene el mejor rendimiento (de 10,21 g/kWh) y a pesar de consumir el doble de energía que T₁ produce un 270% más masa, volviéndolo más rentable.

Tabla 4-12. Comparación energética entre tratamientos.

Tratamiento	Masa total producida (g)	Consumo iluminación (kWh)	Rendimiento (g/kWh)
T1	963,4	127,20	7,57
T2	2598,0	254,40	10,21
T3	1591,0	254,40	6,25

Es necesario considerar el tipo de producto y presentación final que se puede producir en SHIOC siendo estas hortalizas de no más de 30 cm de alto en empaques sellados. Dentro de las opciones de hortalizas está la, lechuga, la rúcula, la albahaca y el bok choy en presentaciones como las mostradas en la Figura 4-23 donde se observa una conceptualización

del producto procesado ofrecido en paquetes de hasta 250 g. La masa promedio de una lechuga cultivada en invernadero oscila entre los 200 g a 400 g [47], [48], lo que está por encima de la producción máxima alcanzada en esta investigación por SHIOC. Sin embargo, las hojas se pueden cosechar pequeñas, conocidas como baby o tiernas, debido a que en este formato el valor tiende a ser mayor y como en SHIOC se controla la iluminación es más sencillo obtener un ciclo de producción constante. El mejoramiento de la receta lumínica de SHIOC tiene el potencial para mejorar la producción de biomasa para ser más atractivo para el mercado.



Figura 4-23. Ejemplos de productos y presentación para cultivos de SHIOC.

Uno de los mantenimientos más costosos que se pueden realizar en los invernaderos es el cambio del plástico de polietileno con cubierta de protección de rayos ultravioleta que conforma sus paredes cual debe ser cambiado cada 4 o 5 años [49] debido a que se opaca o se rompe por las condiciones climatológicas. Este suele ser el costo más elevado de mantenimiento presente en los invernaderos. En SHIOC el costo de mantenimiento más elevado es el reemplazo de los LED que por lo general tienen una vida útil de 100 000 h a 300 000 h [30] equivalente, en promedio, 6 Mis a 28 años de vida útil operando con un fotoperiodo de 16 h, siendo otra ventaja competitiva para el sistema hidropónico orbital.

En un invernadero de 20 m de ancho y 50 m de largo se puede producir cerca de 6 600 lechugas [47], con SHIOC se puede producir aproximadamente 66 667 operando a un solo nivel, si se colocan tres niveles (lo que sería el modo de operación para el cual fue diseñado) se puede producir 200 000 lechugas en el mismo espacio, equivalente a un 3 000% más de producto. Si se desea tener una producción equivalente a la del invernadero, se

necesitarían únicamente 33 m² (operando a tres niveles con 66 máquinas) lo que es equivalente a un 3,3% del espacio del invernadero. Lo anterior reduce considerablemente los costos de la tenencia de tierra, el material de instalación (como tuberías o cableado eléctrico) y permite colocar la sección de postcosecha en el mismo espacio que el de producción disminuyendo los riesgos de contaminación. Debido al bajo requerimiento de espacio la producción puede trasladarse a centros urbanos o con alta densidad de población ofreciendo productos de mayor frescura y reduciendo costos de transporte.

Finalmente se debe considerar el aspecto de la fuente de energía eléctrica, debido a que en SHIOC este sería el mayor costo. Tomando el ejemplo anterior y deseando una producción de 6 600 lechugas se ocupa un total de 22 600 kWh para abastecer todos los equipos. Esta energía puede provenir de paneles solares como el EVP400H de Panasonic con una potencia máxima de 400 W [50]. Por medio del programa SAM [51] se estimó que una distribución de 200 paneles EVP400H ubicada en la Garita de Alajuela en promedio produce 10 033,09 kWh lo que representa un 44% del total de energía requerido en un espacio de 358 m². La Figura 4-24 muestra la producción mensual estimada donde el valor mínimo ocurre en Junio lo que representa el 35% de la energía necesaria, la mayor producción ocurre en Enero con un 58% del total requerido. Ya que las máquinas SHIOC ocupan 33 m² se dispone de 325 m² para el área de postcosecha, limpieza, empaquetado, almacenamiento y oficina administrativa. Todo esto se realiza en un tercio del espacio original del invernadero densificando la cadena productiva lo que aumenta el rendimiento del uso del suelo.

Producción mensual de energía eléctrica con paneles solares

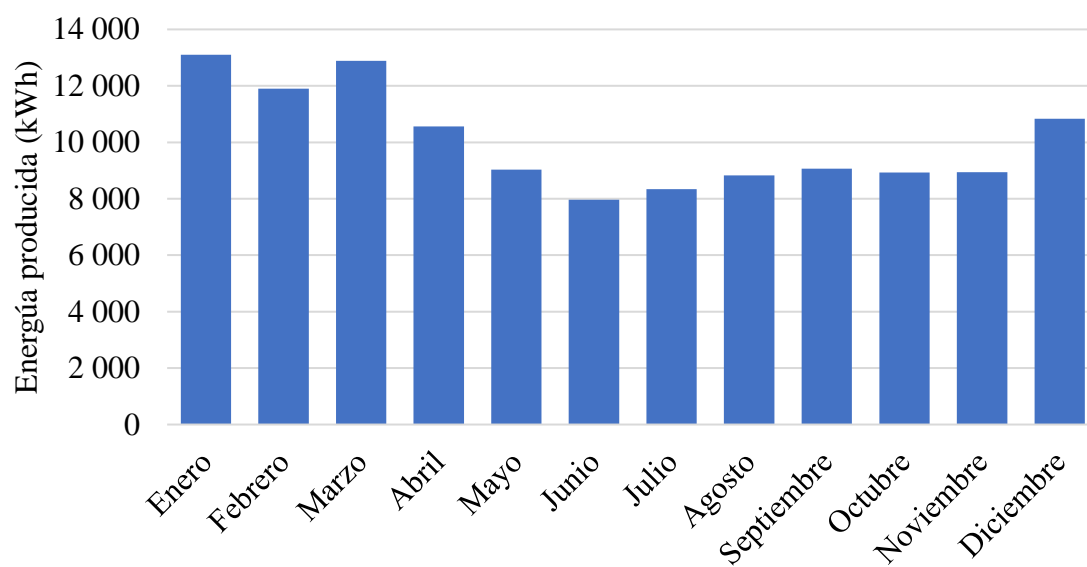


Figura 4-24. Producción mensual de energía eléctrica.

5. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas en la investigación según objetivo específico.

5.1 Conclusiones del objetivo específico a.

- 1) El diseño de luz del sistema hidropónico orbital opera en un rango entre $240 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y $260 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 2) Se documentó la presencia del efecto de borde en todos los tratamientos debido a la disminución de la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos en los bordes del sistema que afectan el rendimiento en las plantas.

5.2 Conclusiones del objetivo específico b.

- 1) Se determinó, con un enfoque multivariado, que el fotoperiodo, la velocidad de rotación y la interacción de estos factores afectan significativamente a la masa y la R-LA. Puntualmente, el fotoperiodo de 16 h genera una mayor masa que el de 8 h y la velocidad de rotación no presentó diferencias significativas con respecto a la masa. La R-LA aumentó con el tratamiento de 8 h y la velocidad de rotación de 36 rpd; y, disminuyó con el tratamiento lumínico de 16 h y la velocidad de rotación de 18 rpd.
- 2) La velocidad de rotación de 18 rpd generó una deformación del tallo en forma de “U” invertida posiblemente causado por efecto del gravitropismo.

5.3 Conclusiones del objetivo específico c.

- 1) En un espacio de 358 m^2 SHIOC puede producir la misma cantidad de lechugas que un invernadero de 1000 m^2 alimentado parcialmente por energía solar y con la cadena productiva en un mismo lugar.
- 2) El tratamiento T2 compuesto por un fotoperiodo de 16 h y una velocidad de 36 rpd presentó los mejores resultados de rendimiento agrícola y de inversión energética para producir biomasa. Este tratamiento tuvo además la menor tasa de mortalidad sin deformaciones visibles en la planta.

6. RECOMENDACIONES

La presencia del fenómeno de gravitropismo y las observaciones realizadas llevan a valorar el uso de velocidades superiores a 36 rpd para determinar si se aprecian otro tipo de fenómenos en combinación con diferentes fotoperiodos con el fin de generar más información que permitan generar un modelo matemático para poder tomar decisiones sobre los modos de operación óptimos del sistema. También se sugiere reforzar el sistema de iluminación artificial para que logre alcanzar un PFD de $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ y experimentar con la geometría del mismo en los bordes para reducir su efecto sobre la producción de biomasa.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organización de las Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales División de Población, *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. 2017.
- [2] K. J. Thomson, «World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective», *Land use policy*, vol. 20, n.º 4, p. 375, oct. 2003, doi: 10.1016/S0264-8377(03)00047-4.
- [3] T. Kozai, G. Niu, y M. Takagaki, *Plant Factory*. London: Elsevier, 2016.
- [4] J. Porter *et al.*, «Food security and food production systems», en *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. Field, V. Barros, D. Dokken, K. Mach, M. Mastrandrea, T. Bilir, M. Chatterjee, K. Ebi, Y. Estrada, R. Genova, B. Girma, E. Kissel, A. Levy, S. MacCracken, P. Mastrandrea, y L. White, Eds. United Kingdom y New York, USA: Cambridge University Press, 2014, pp. 485-533 [Online]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf. [Accedido: 29 de marzo de 2023]
- [5] J. L. Hatfield *et al.*, «Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production», *Agron J*, vol. 103, n.º 2, pp. 351-370, mar. 2011, doi: 10.2134/agronj2010.0303.
- [6] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, *Climate-Smart Agriculture*. Rome, 2013.
- [7] D. Štreimikienė, T. Baležentis, A. Volkov, E. Ribašauskienė, M. Morkūnas, y A. Žičkienė, «Negative effects of covid-19 pandemic on agriculture: systematic literature review in the frameworks of vulnerability, resilience and risks involved», *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, vol. 35, n.º 1, pp. 529-545, dic. 2022, doi: 10.1080/1331677X.2021.1919542. [Online]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1331677X.2021.1919542>

- [8] German Aerospace Center (DLR), «Designing an Economically Feasible Vertical Farm – A combined European Endeavor for Sustainable Urban Agriculture», 2015.
- [9] S. Rojas, «Diseño de un sistema hidropónico orbital como alternativa de producción de alimento de alta intensidad en zonas urbanas.», Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2019 [Online]. Disponible en: <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2019/10/TFG-SergioRojasM.pdf>
- [10] G. J. Graff, «Skyfarming», University of Waterloo, 2011.
- [11] P. Erdi, *Complexity Explained*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [12] C. L. Ballaré, C. A. Mazza, A. T. Austin, y R. Pierik, «Canopy Light and Plant Health», *Plant Physiol*, vol. 160, n.º 1, pp. 145-155, sep. 2012, doi: 10.1104/pp.112.200733.
- [13] M. Chen y J. Chory, «Phytochrome signaling mechanisms and the control of plant development», *Trends Cell Biol*, vol. 21, n.º 11, pp. 664-671, nov. 2011, doi: 10.1016/j.tcb.2011.07.002.
- [14] L. Costa, Y. Millan Montano, C. Carrión, N. Rolny, y J. J. Guiamet, «Application of low intensity light pulses to delay postharvest senescence of *Ocimum basilicum* leaves», *Postharvest Biol Technol*, vol. 86, pp. 181-191, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.017>.
- [15] S. Demotes-Mainard *et al.*, «Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture», *Environ Exp Bot*, vol. 121, pp. 4-21, ene. 2016, doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.05.010.
- [16] T. Dueck, J. Janse, B. Eveleens-Clark, F. Kempkes, y L. F. M. Marcelis, «Growth of tomatoes under Hybrid LED and HPS lighting», *Acta Hortic*, vol. 952, ene. 2011, doi: 10.17660/ActaHortic.2012.952.42.
- [17] M. M. Maboko y C. P. Du Plooy, «Effect of plant spacing on growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a soilless production system», *South African Journal of*

- Plant and Soil*, vol. 26, n.º 3, pp. 195-198, 2009, doi: 10.1080/02571862.2009.10639954.
- [18] A. Manukyan, «Effects of PAR and UV-B Radiation on Herbal Yield, Bioactive Compounds and Their Antioxidant Capacity of Some Medicinal Plants Under Controlled Environmental Conditions», *Photochem Photobiol*, vol. 89, n.º 2, pp. 406-414, mar. 2013, doi: 10.1111/j.1751-1097.2012.01242.x.
- [19] C. L. Chang y K. P. Chang, «The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple wavelength-band light-emitting diode lighting», *Sci Hortic*, vol. 179, pp. 78-84, 2014, doi: 10.1016/j.scienta.2014.09.013.
- [20] IPCC, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007.
- [21] J. L. Hatfield y J. H. Prueger, «Temperature extremes: Effect on plant growth and development», *Weather Clim Extrem*, vol. 10, pp. 4-10, dic. 2015, doi: 10.1016/j.wace.2015.08.001.
- [22] Y. P. Abrol y K. T. Ingram, «Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants.», en *Global Climate Change and Agricultural Production: Direct and Indirect Effect of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes*, 1996, n.º 1, pp. 123-140.
- [23] B. Noureddine, *Climate change and crop production : foundations for agroecosystem resilience*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2018.
- [24] K. Ayyogari, P. Sidhya, y M. K. Pandit, «Impact of Climate Change on Vegetable Cultivation - A Review», *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, vol. 7, n.º 1, p. 145, 2014, doi: 10.5958/j.2230-732X.7.1.020.
- [25] Organización de las Naciones Unidas (ONU), «Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL», p. 43, 2018.

- [26] M. Anpo, H. Fukuda, y T. Wada, *Plant Factories With Artificial Light. Adapting to Environmental Disruption and Clues to*. Amsterdam: ELsevier, 2019.
- [27] M. Ueno y. Kawamitsu, «Design of a plant factory suitable for Okinawa», *Engineering and Applied Science Research*, vol. 44, n.º 3, pp. 182-188, 2017, doi: 10.14456/easr.2017.27.
- [28] Green Sense Farms Holdings, «Green Sense Farms», 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.greensensefarms.com/>
- [29] SPREAD Co, «Spread Co», 2020. [Online]. Disponible en: <https://spread.co.jp/en/>
- [30] T. Kozai, F. Kazuhiro, y E. S. Runkle, *LED Lighting for Urban Agriculture*, First Edit. Singapore: Springer Singapore, 2016 [Online]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-1848-0>
- [31] R. Blankenship, *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 2002 [Online]. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470758472>
- [32] M. Pessaraki, *Handbook of Photosynthesis, Third Edition*. Taylor & Francis Group, 2016.
- [33] S. C. Bhatla y M. A. Lal, *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Singapore: Springer Singapore, 2018 [Online]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-2023-1>
- [34] N. Willey, *Environmental Plant Physiology*. New Yotk: Garland Science, Taylor & Francis Group, 2016 [Online]. Disponible en: <http://taylorandfrancis.com>
- [35] H. M. Resh, *Hydroponics for the Home Grower*. 2015.
- [36] P. Pattison, B. Steve, B. Norman, y L. Pattison, *Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan*. 2014 [Online]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/269633791>
- [37] M. Nisa Khan, *Understanding LED Illumination*. Taylor & Francis Group, 2013.

- [38] V. K. Khanna, *Fundamentals of solid-state lighting: LEDs, OLEDs, and their applications in illumination and displays*. Taylor & Francis Group, 2014.
- [39] C. Piovene *et al.*, «Optimal red:blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture», *Sci Hortic*, vol. 193, pp. 202-208, sep. 2015, doi: 10.1016/j.scienta.2015.07.015.
- [40] G. Pennisi *et al.*, «Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs», *Sci Hortic*, vol. 272, n.º April, p. 109508, oct. 2020, doi: 10.1016/j.scienta.2020.109508.
- [41] A. Brazaityte *et al.*, «The effect of light-emitting diodes lighting on the growth of tomato transplants», *Zemdirbyste*, vol. 97, n.º 2, pp. 89-98, 2010.
- [42] R Core Team, «R: A Language and Environment for Statistical Computing». R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022.
- [43] P. Virtanen *et al.*, «SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python», *Nat Methods*, vol. 17, n.º 3, pp. 261-272, mar. 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [44] J. H. Kang, S. KrishnaKumar, S. L. S. Atulba, B. R. Jeong, y S. J. Hwang, «Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system», *Hortic Environ Biotechnol*, vol. 54, n.º 6, pp. 501-509, dic. 2013, doi: 10.1007/s13580-013-0109-8. [Online]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s13580-013-0109-8>
- [45] S.-H. Su, N. M. Gibbs, A. L. Jancewicz, y P. H. Masson, «Molecular Mechanisms of Root Gravitropism», *Current Biology*, vol. 27, n.º 17, pp. R964-R972, sep. 2017, doi: 10.1016/j.cub.2017.07.015. [Online]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982217308734>
- [46] H. Chauvet, B. Moulia, V. Legué, Y. Forterre, y O. Poulouen, «Revealing the hierarchy of processes and time-scales that control the tropic response of shoots to gravi-stimulations», *J Exp Bot*, vol. 70, n.º 6, pp. 1955-1967, mar. 2019, doi:

- 10.1093/jxb/erz027. [Online]. Disponible en: <https://academic.oup.com/jxb/article/70/6/1955/5420653>
- [47] G. Martínez Carrillo, A. Lara Herrera, L. Evelia Padilla Bernal, M. Luna Flores, J. Jesús Avelar Mejía, y J. Jesús Llamas, «Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno», *Terra Latinoam*, vol. 33, n.º 3, sep. 2015.
- [48] S. C. Holmes, D. E. Wells, J. M. Pickens, y J. M. Kemble, «Selection of Heat Tolerant Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivars Grown in Deep Water Culture and Their Marketability», *Horticulturae*, vol. 5, n.º 3, p. 50, jul. 2019, doi: 10.3390/horticulturae5030050. [Online]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2311-7524/5/3/50>
- [49] Nexus Plastics Inc, «Polyethylene Greenhouse Covering: Pros and Cons», 4 de febrero de 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.nexusplastics.com/polyethylene-greenhouse-coverings-pros-and-cons/>. [Accedido: 4 de enero de 2023]
- [50] Panasonic, «410W/400W EVERVOLT™ SOLAR MODULE SERIES», 2021 [Online]. Disponible en: https://ftp.panasonic.com/solar/datasheet/ds_evvp410h_400h.pdf. [Accedido: 1 de septiembre de 2022]
- [51] National Renewable Energy Laboratory, «System Advisor Model». Golden, CO. [Online]. Disponible en: <https://sam.nrel.gov/>. [Accedido: 4 de enero de 2023]

8. ANEXOS

8.1 Composición química de la solución hidropónica mayor

Elemento	Porcentaje (%) (P/V)
Nitrógeno (N)	5,00
Fósforo (P ₂ O ₅)	4,60
Potasio (K ₂ O)	4,81
Magnesio (MgO)	1,30
Calcio (CaO)	2,80
Inertes	81,49
Total	100,00

8.2 Composición química de la solución hidropónica menor

Elemento	Porcentaje (%) (P/V)
Magnesio (MgO)	2,80
Azufre (S)	2,00
Boro (B)	0,04
Cobre (Cu)	0,01
Hierro (Fe)	1,60
Manganeso (Mn)	0,04
Molibdeno (Mo)	0,00024
Zinc (Zn)	0,04
Sodio (Na)	0,02
Inertes	93,45
Total	100,00

8.3 Código de análisis estadístico en R.

```
#cargar base de datos
my_data = read_excel('lettuce.xlsx', sheet = "ANOVA")
summary(my_data)
```

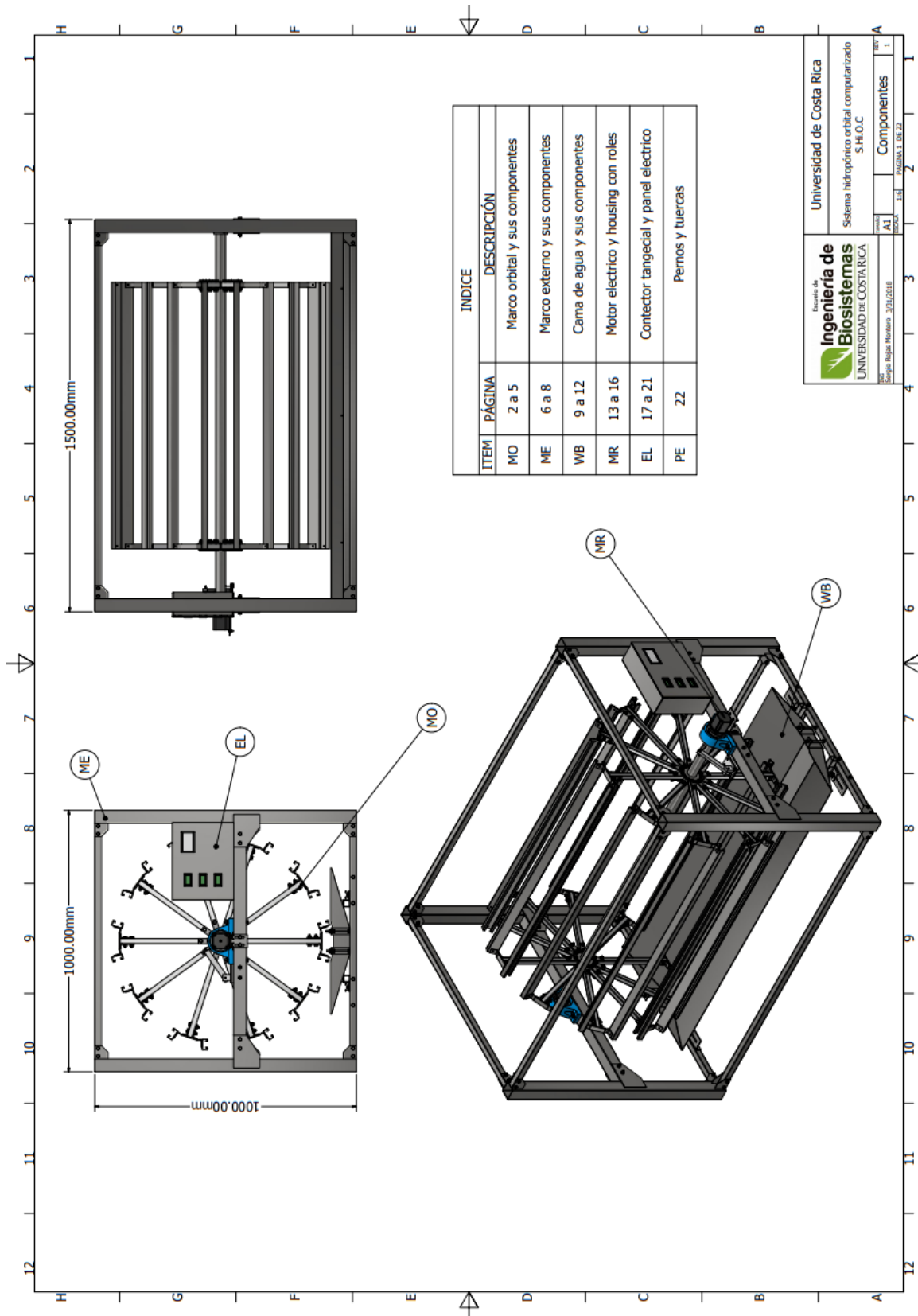
```

#revisión de outliers
cutoff = qchisq(1-.001, ncol(my_data[ , c('Masa','Ratio')]))
mahal = mahalnobis(my_data[ , c('Masa','Ratio')],
                  colMeans(my_data[ , c('Masa','Ratio')]),
                  cov(my_data[ , c('Masa','Ratio')]))
ncol(my_data[ , c('Masa','Ratio')])
summary(mahal < cutoff)
#eliminación de outliers
noout = subset(my_data, mahal < cutoff)
#colinealidad múltiple
correl = cor(noout[ , c('Masa','Ratio')], use = "pairwise.complete.obs")
correl
#preparación de datos para revisar las asunciones
random = rchisq(nrow(noout), 7)
fake = lm(random~., data = noout[ , c(1:5)])
standardized = rstudent(fake)
fitted = scale(fake$fitted.values)
# normalidad multivariada
qqnorm(standardized,main = "Gráfica Q-Q normal",,
       xlab="Cuantiles Teóricos",
       ylab="Cuantiles de muestra")
abline(0,1)
#Homogeneidad de la variancia y covariancia
plot(fitted,standardized,xlab="Ajustado", ylab="Estandarizado")
title(main="Homogeneidad de la varianza y covariancia")
abline(0,0)
abline(v = 0)
# prueba de levene
library(car)
leveneTest(Masa ~ Foto*Vel,
          data = noout, center = mean)
leveneTest(Ratio ~ Foto*Vel,
          data = noout, center = mean)
#manova de dos vías
library(car)
DV = cbind(noout$Masa, noout$Ratio)
output = lm(DV ~ Foto*Vel, data = noout,
           contrasts=list(Foto=contr.sum, Vel=contr.sum))
manova_out = Manova(output, type = "III")
summary(manova_out, multivariate = T)
#Anova para masa con fotoperiodo y velocidad
table= Anova(lm(Masa~Foto*Vel,contrasts=list(Foto='contr.sum', Vel ='contr.sum'), data =
noout),type='III')
table
#Anova para ratio con fotoperiodo y velocidad
table= Anova(lm(Ratio~Foto*Vel,contrasts=list(Foto='contr.sum', Vel ='contr.sum'), data =
noout),type='III')
table
#Anova para masa y fotoperiodo
library(car)
table= Anova(lm(Masa~Foto,contrasts=list(Foto='contr.sum'), data = my_data),type='III')
table
#Anova para masa y velocidad
table= Anova(lm(Masa~Vel,contrasts=list(Vel='contr.sum'), data = my_data),type='III')
table
#Anova para ratio y fotoperiodo

```

```
table= Anova(lm(Ratio~Foto,contrasts=list(Foto='contr.sum'), data = my_data),type='III')
table
#Anova para ratio y velocidad
table= Anova(lm(Ratio~Vel,contrasts=list(Vel='contr.sum'), data = my_data),type='III')
table
```


8.4 Planos de diseño de SHIOC



INDICE	
ITEM	PÁGINA
MO	2 a 5
ME	6 a 8
WB	9 a 12
MR	13 a 16
EL	17 a 21
PE	22

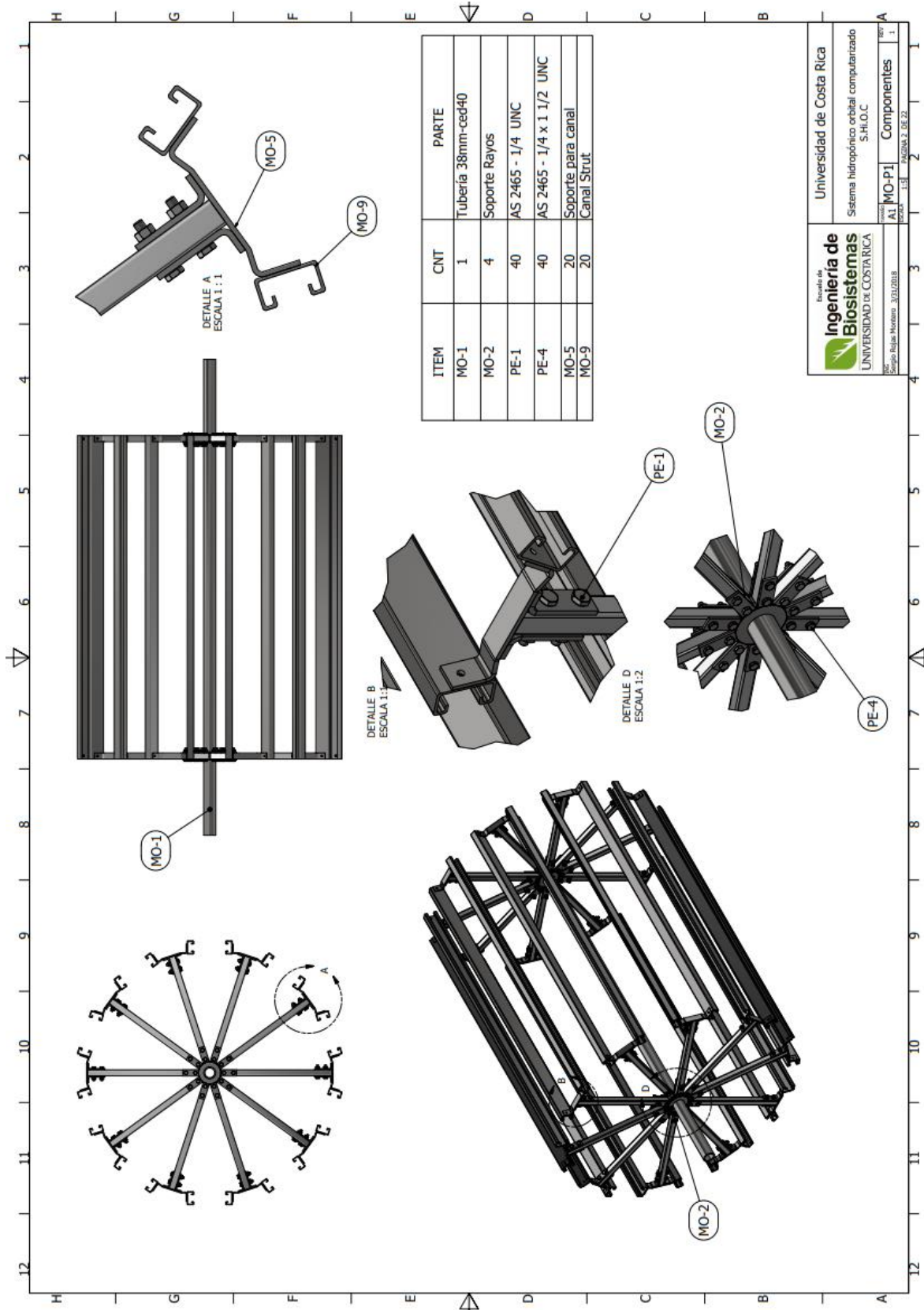
Escuela de
**Ingeniería de
Biosistemas**
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

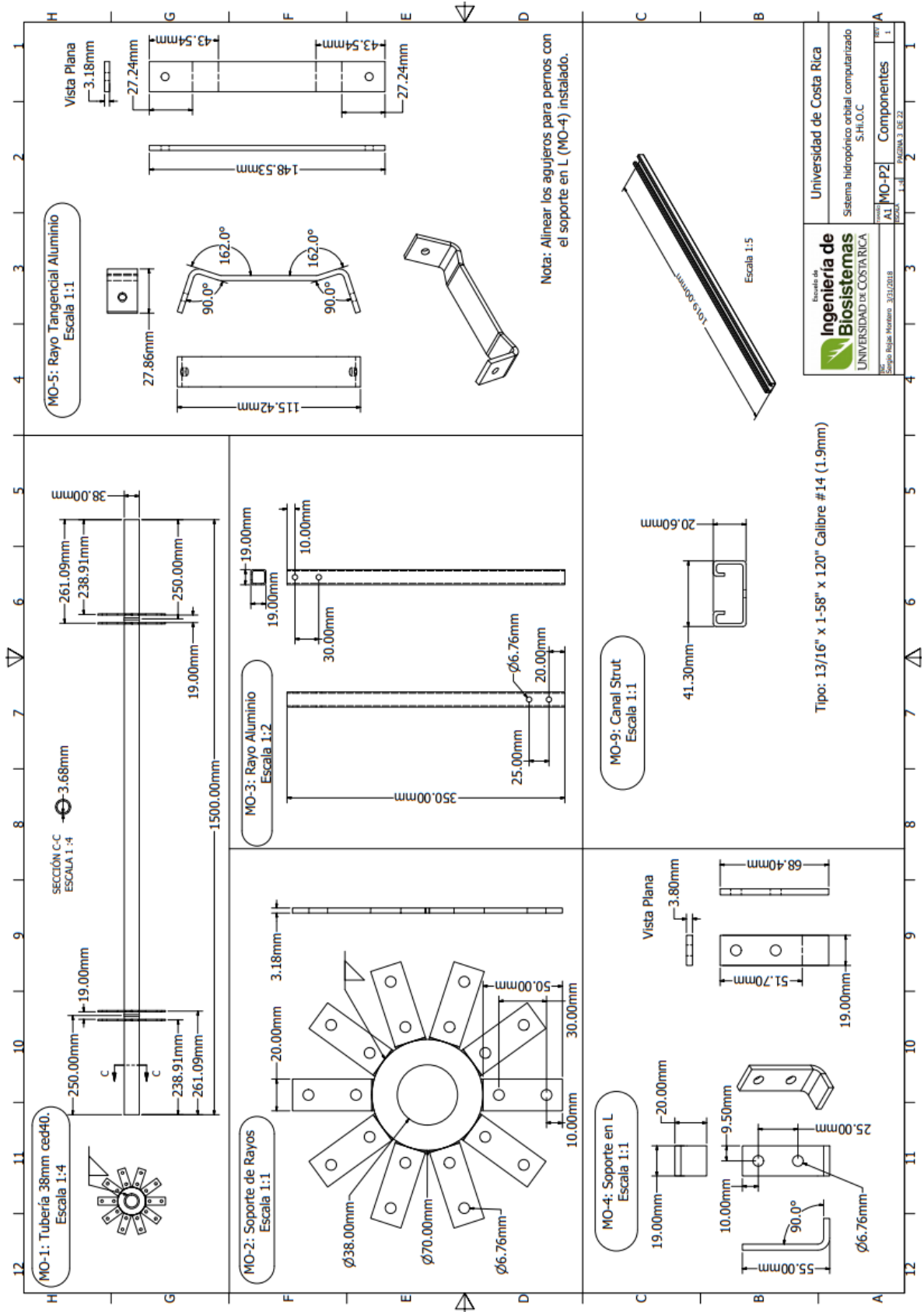
San José, Bajos Muelles 30112018

Universidad de Costa Rica

Sistema hidropónico orbital computarizado
S.H.I.O.C

AL	1
COMPONENTES	1





Escuela de **Ingeniería de Biosistemas**
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

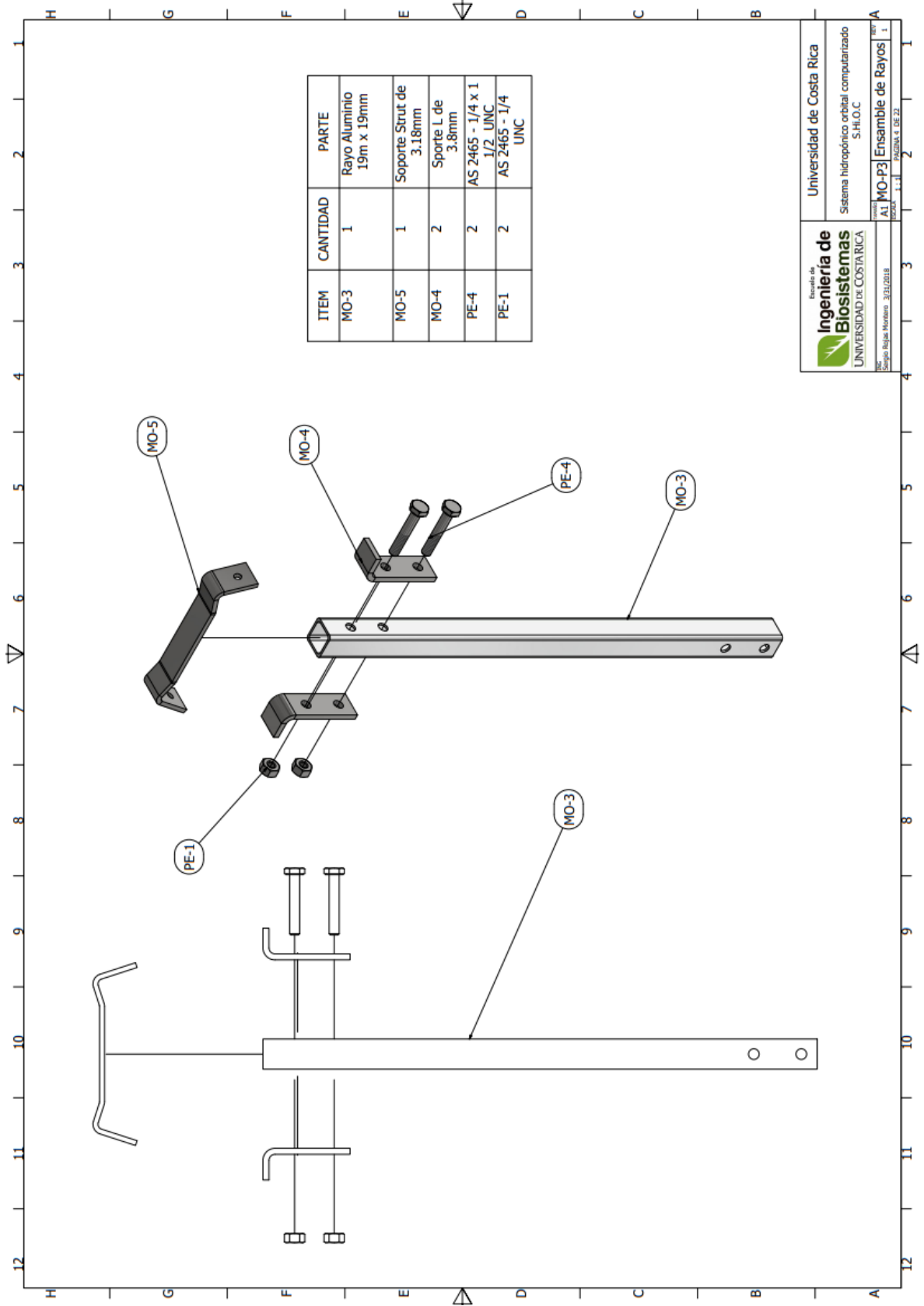
Escuela de Ingeniería de Biosistemas
S.H.I.O.C.
Sistema hidropónico orbital computarizado

Alumno: **MO-PZ**
Código: **3312018**


Componentes

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----



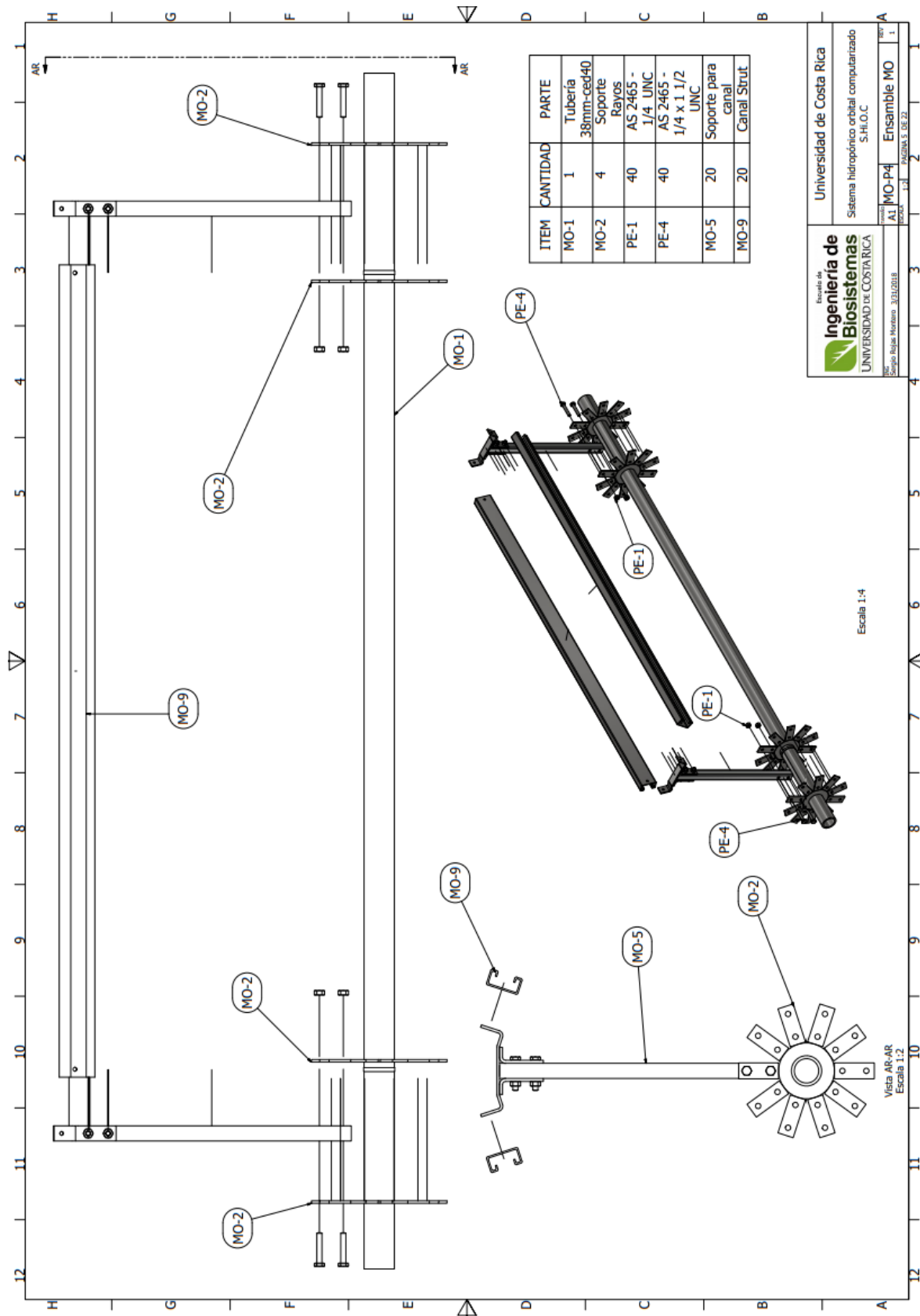
ITEM	CANTIDAD	PARTE
MO-3	1	Rayo Aluminio 19m x 19mm
MO-5	1	Soporte Strut de 3.18mm
MO-4	2	Sporte L de 3.8mm
PE-4	2	AS 2465 - 1/4 x 1 1/2 UNC
PE-1	2	AS 2465 - 1/4 UNC

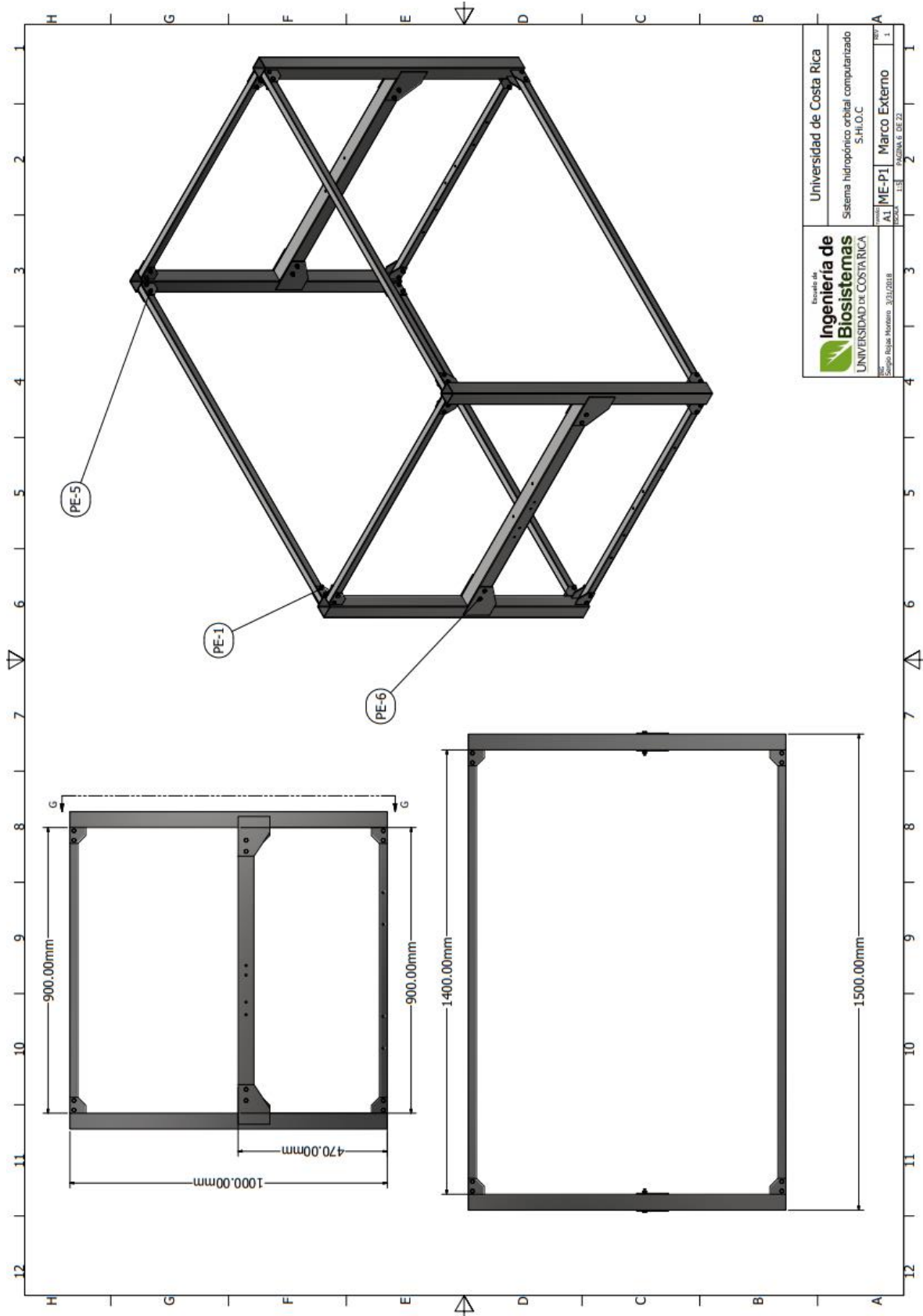


Ingeniería de Biosistemas
 UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

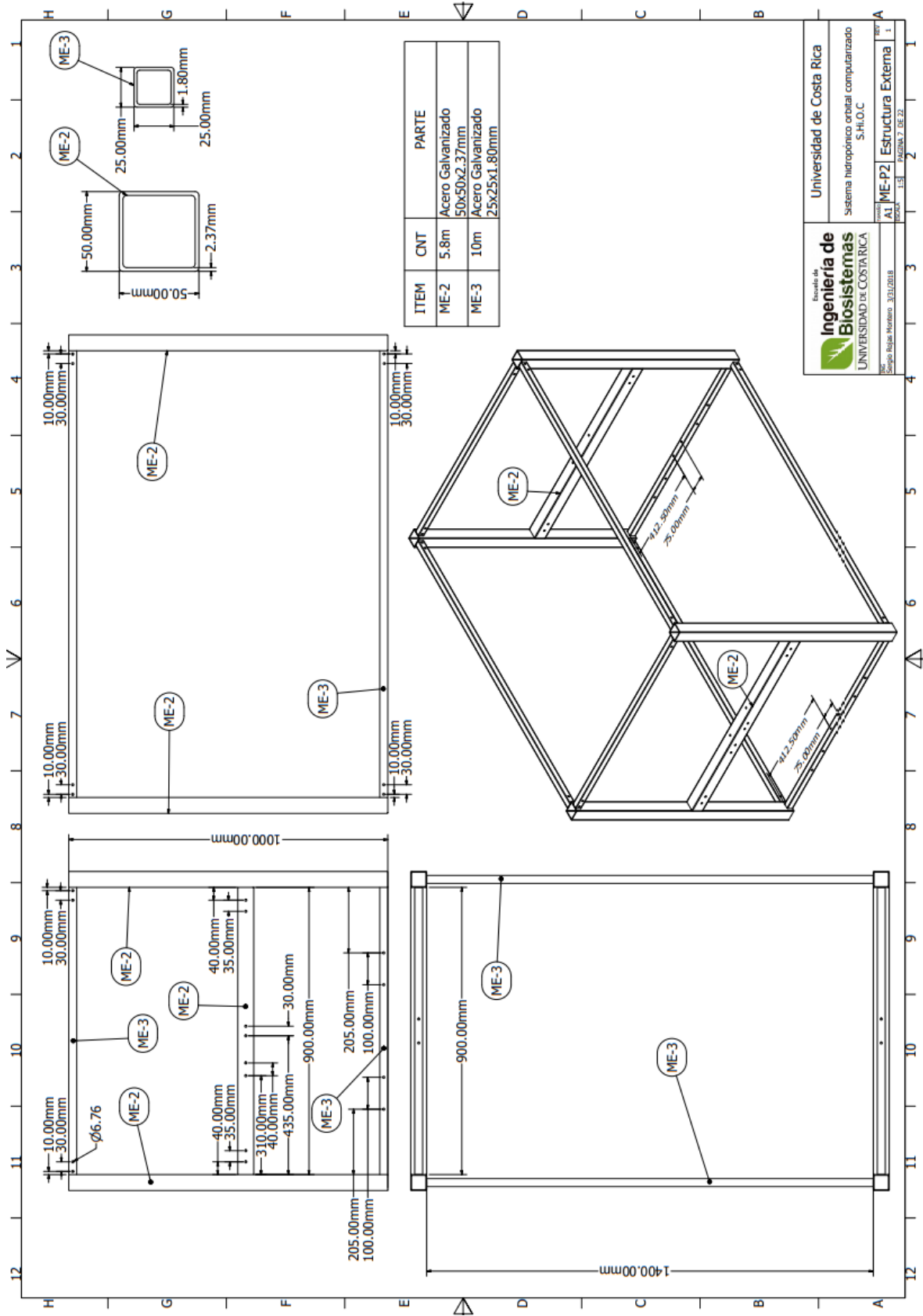
Universidad de Costa Rica
 Sistema hidropónico orbital computarizado
 S.H.O.C.

No. de Proyecto: AI-MO-P3
 Fecha: 3/11/2018
 Versión: 1.1
 Elaborado por: J. DE S.





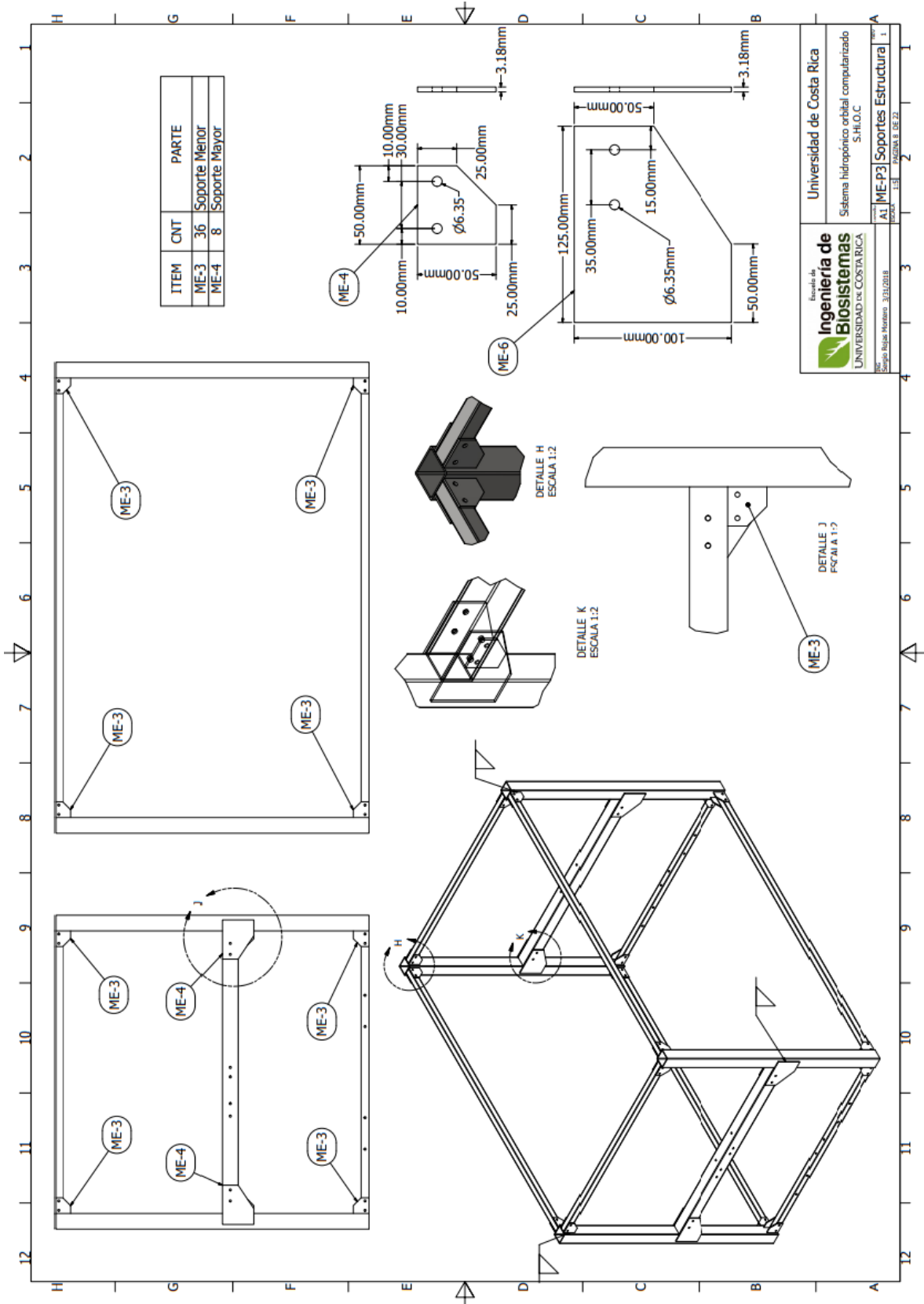
	Universidad de Costa Rica	
	Sistema hidropónico orbital computanzado S.H.O.C	
Escuela de Ingeniería de Biosistemas UNIVERSIDAD DE COSTA RICA San José, Costa Rica 3011/2018	Alumno: ME-P1 Marco Externo	Docente: L.E. RAMONA DE Z. 1

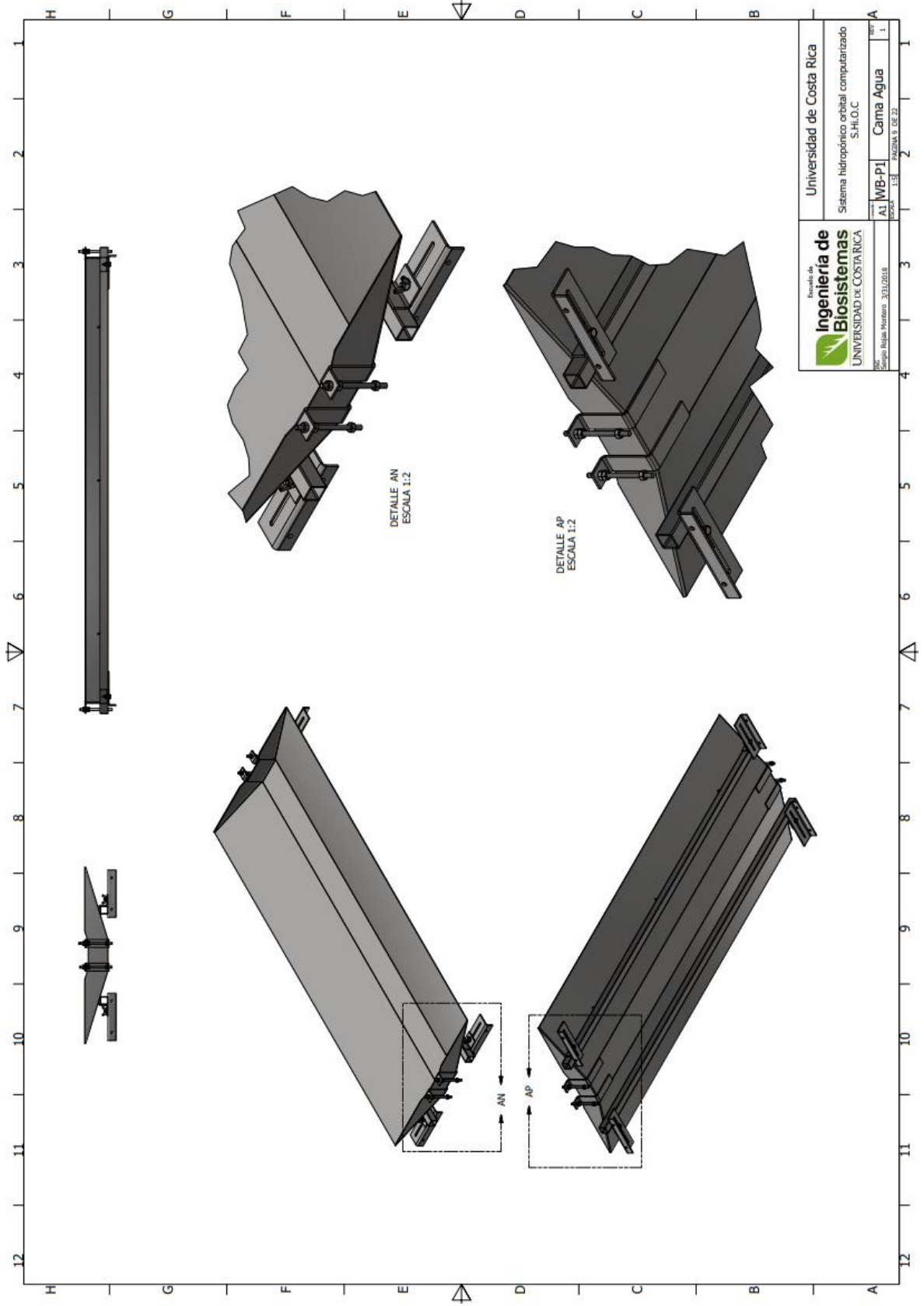


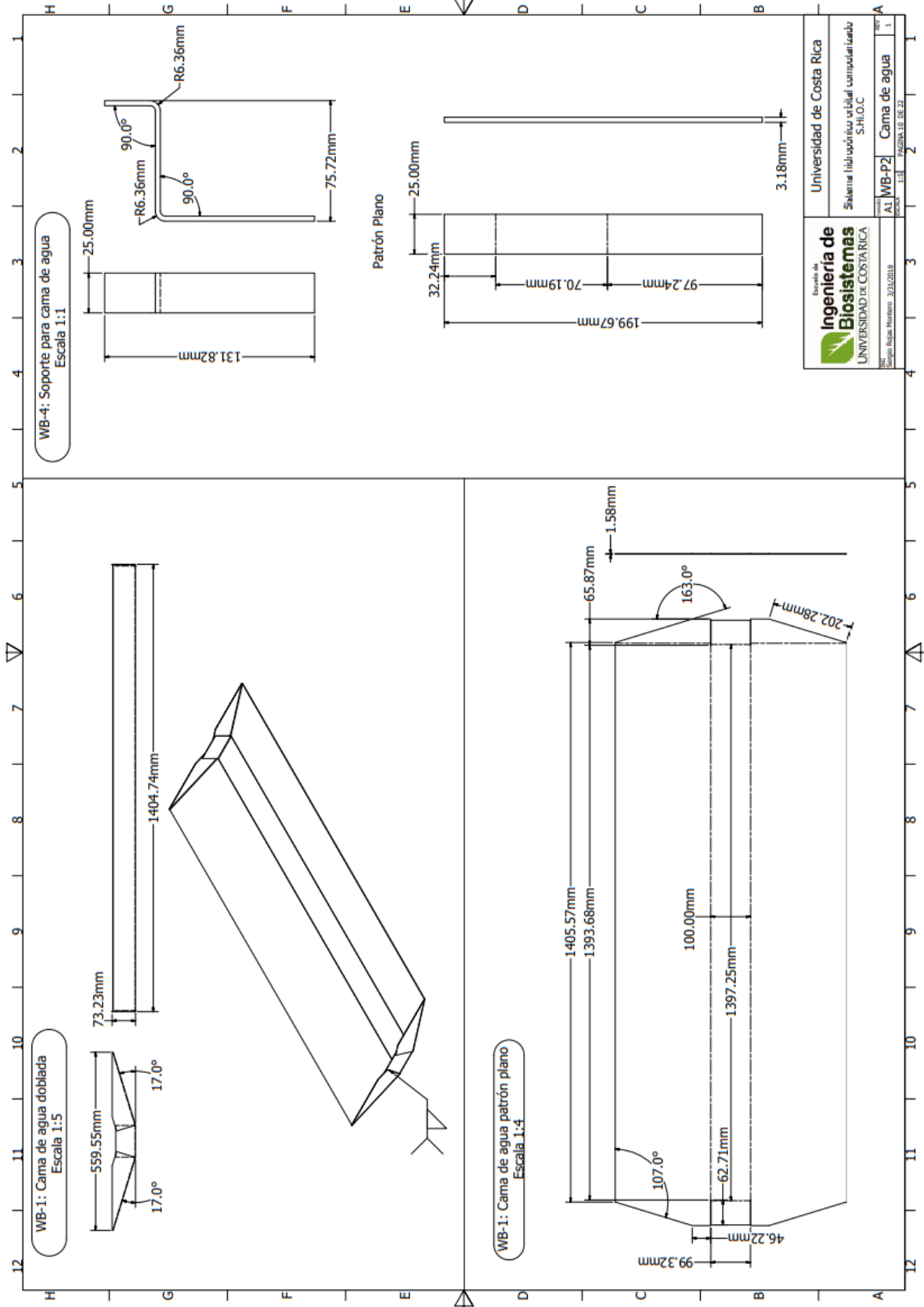

Ingenieria de Biosistemas
 UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

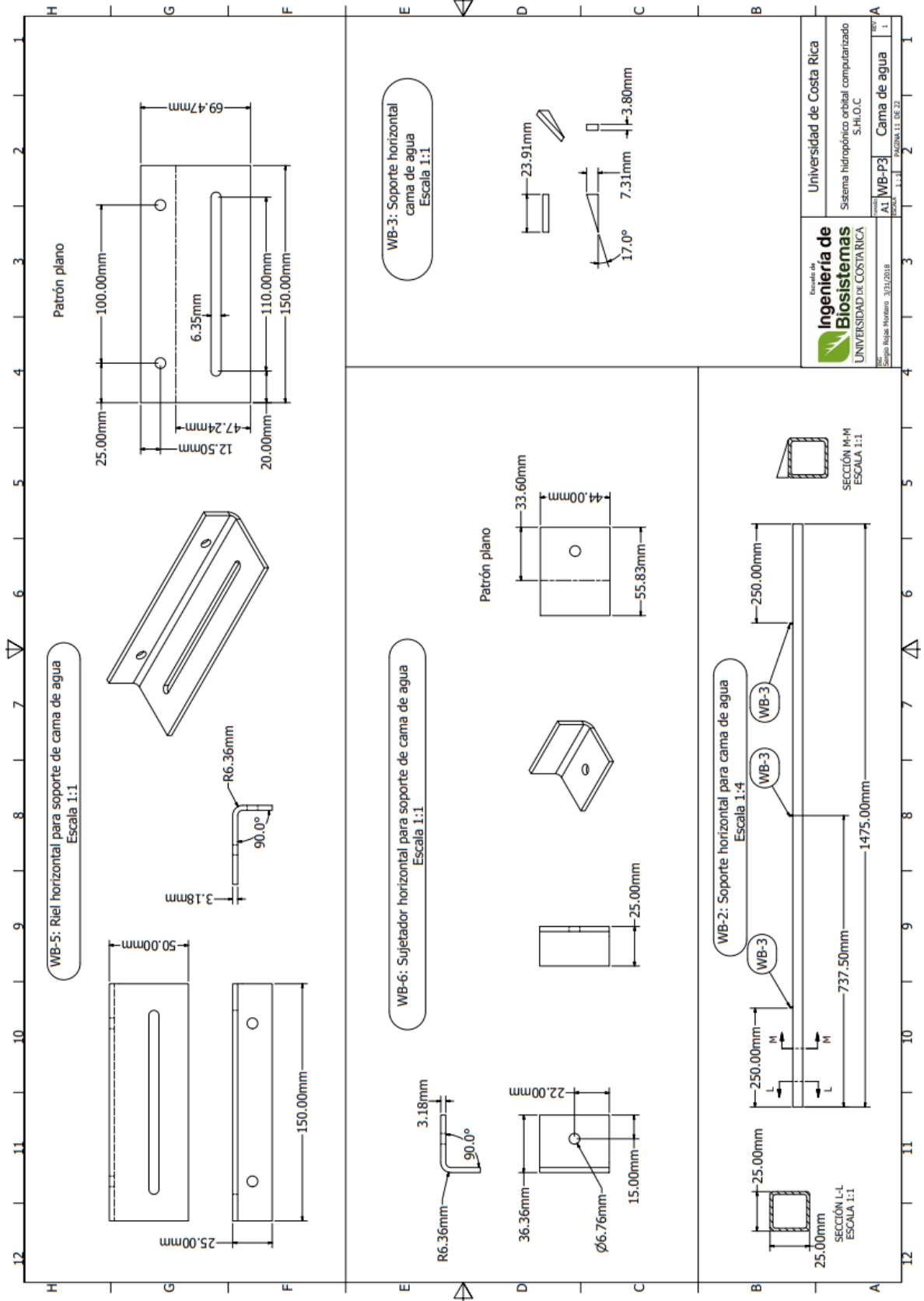
Universidad de Costa Rica
 Sistema hidropónico orbital computarizado
 S.H.I.O.C

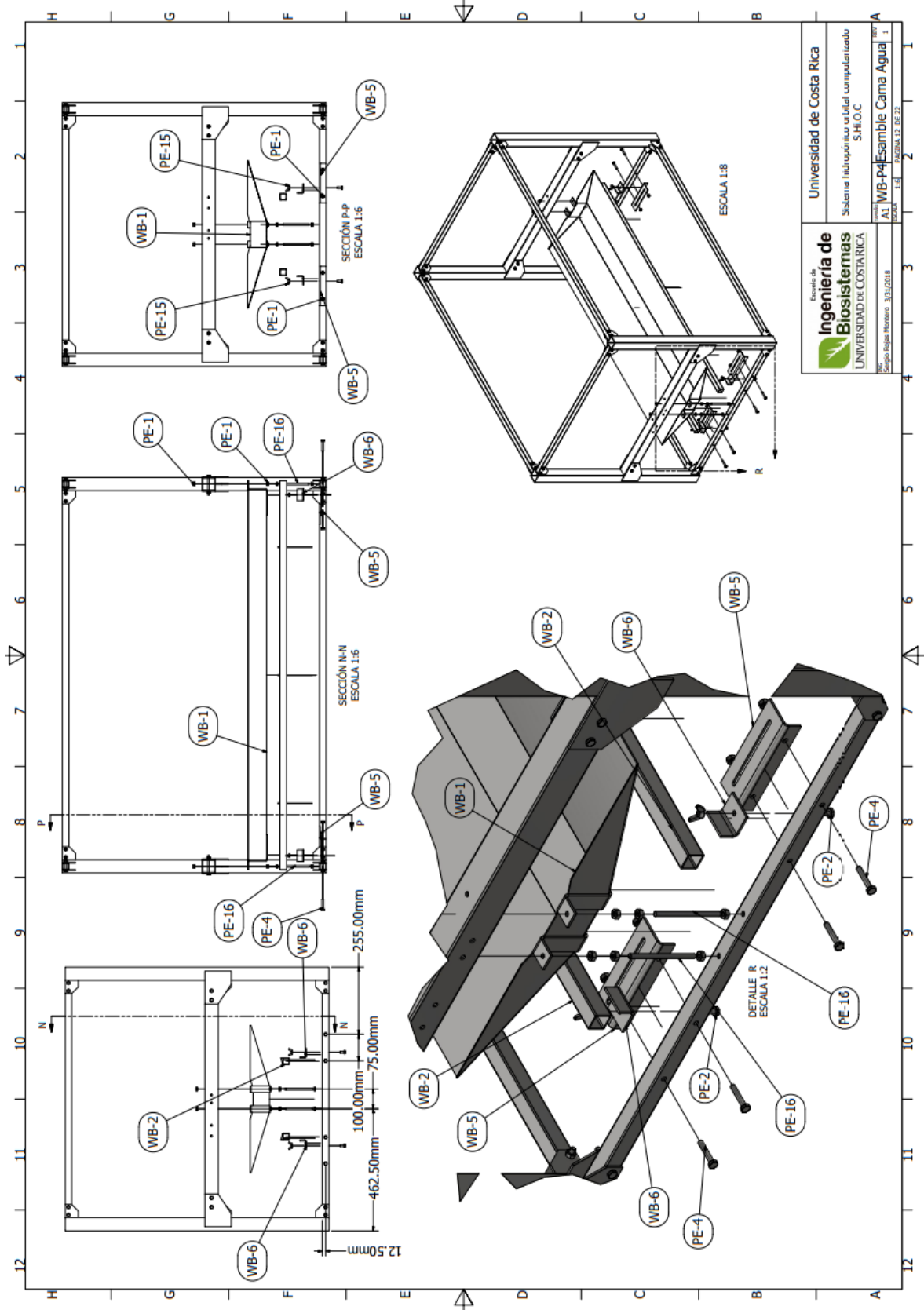
Proyecto: 1.13 Estructura Externa 1
 Autores: Sergio Rojas Morano, 3332818



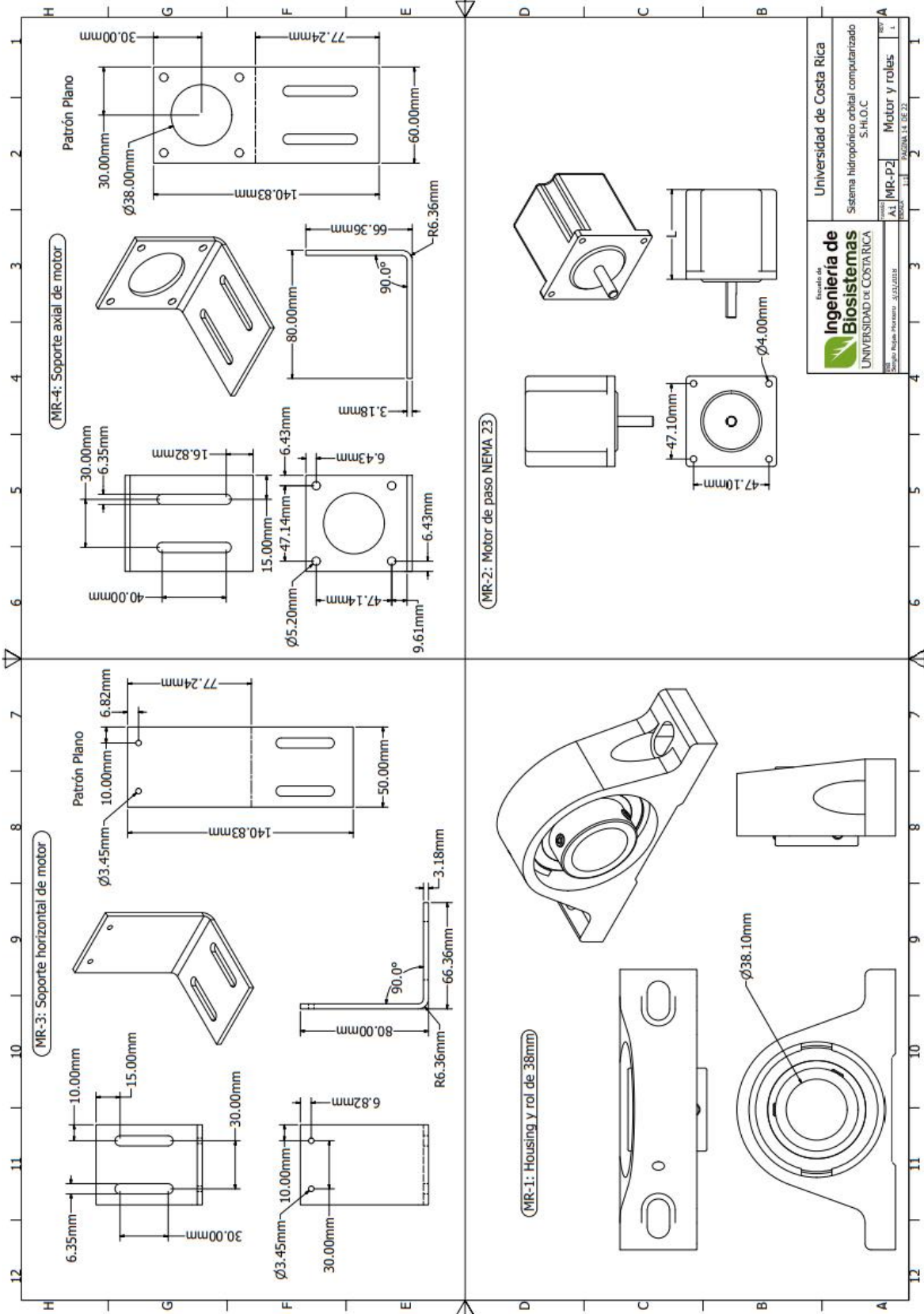








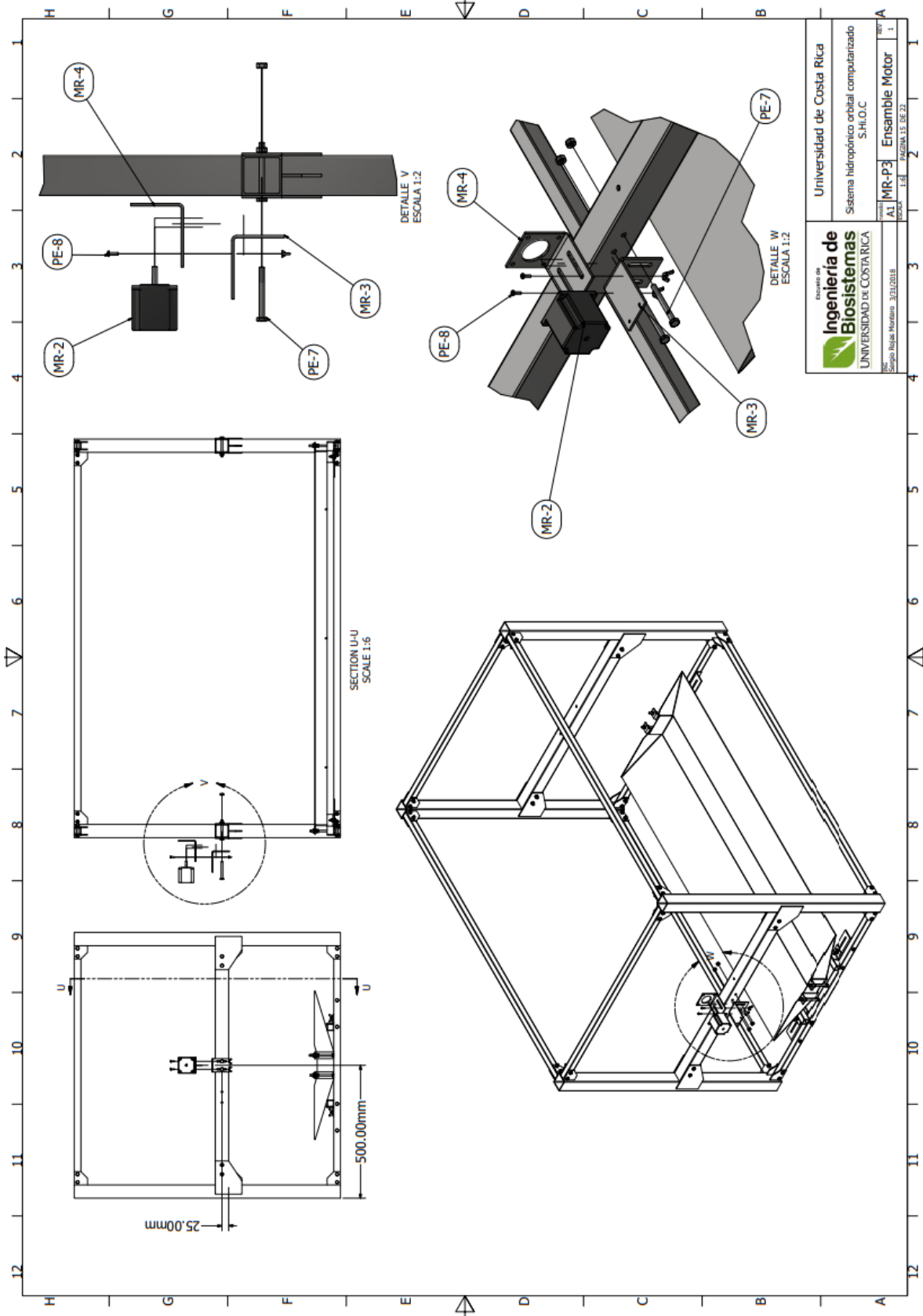
Universidad de Costa Rica
Ingeniería de Biosistemas
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Escuela de Ingeniería de Biosistemas
S.H.O.C.
Carrera de Ingeniería de Biosistemas
31/10/2018
ALWB-P4-Asamble Cama Agua
PÁGINA 12 DE 22



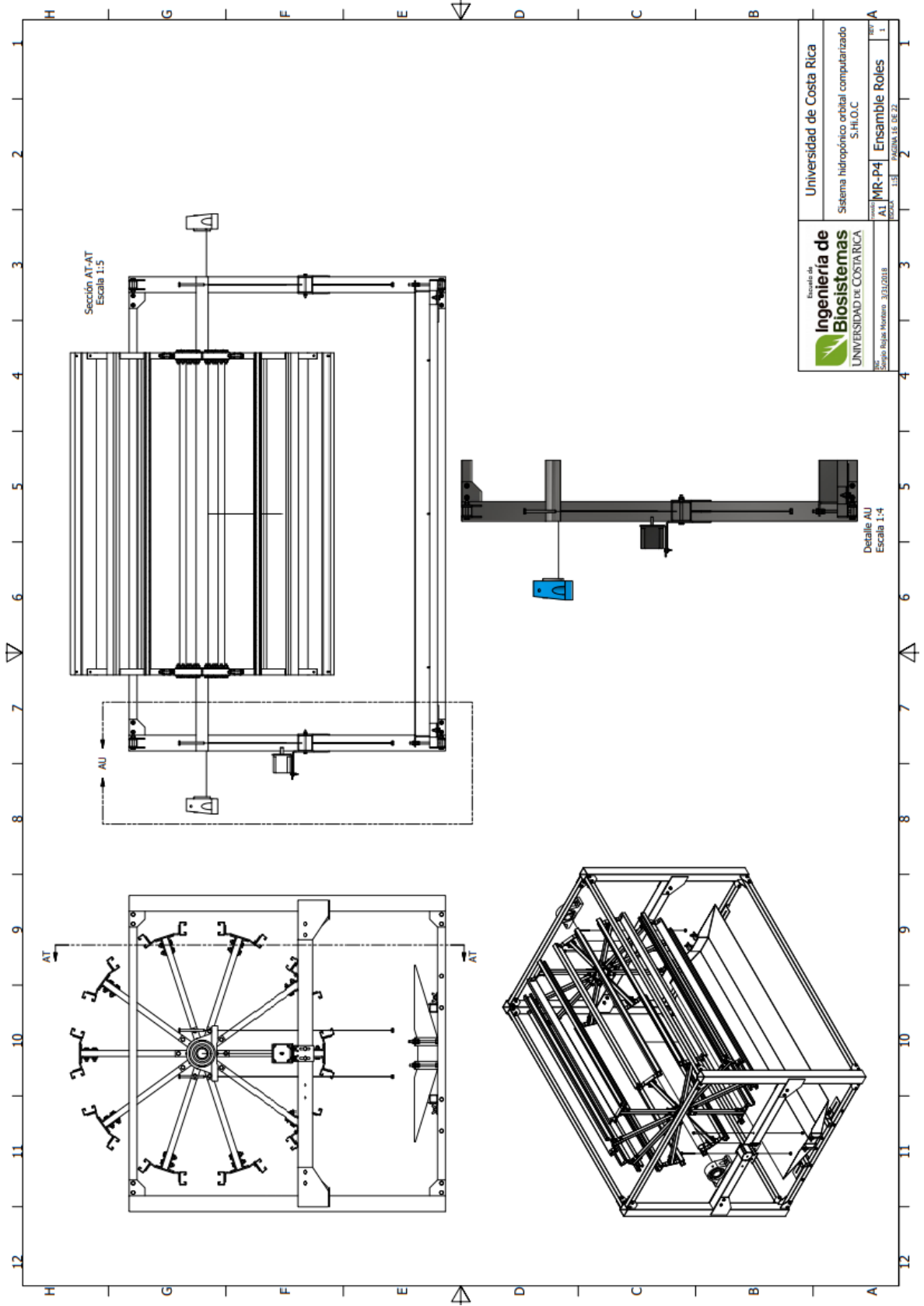
Universidad de Costa Rica
Sistema hidropneumatico orbital computarizado
S.H.O.C

Escuela de Ingenieria de Biosistemas
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Nombre del Proyecto: Motor y rolas
Código del Proyecto: 1111
Fecha: 14 DE 22



Universidad de Costa Rica	
Sistema hidropónico orbital computarizado	
S.Hi.O.C	
Nombre	AI MR-P3 Ensamble Motor
Autores	Sergio Rojas Moreno 31312018
Fecha	11/03/2018
Escala	1:1
Hoja	1
Página 13 de 22	



	Universidad de Costa Rica
	Sistema hidropónico orbital computarizado S.H.I.O.C
Escuela de Ingeniería de Biosistemas	MR-P4
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	Ensamble Roles
Docente: Sergio Rojas Morúa	30310218
Alumno: J. L. S. BARRERA	150822
Fecha: 15/05/2018	1