

CAPÍTULO 1:

PRELIMINARES



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga

Departamento de Ingenierías

REPORTE FINAL PARA ACREDITAR LA RESIDENCIA PROFESIONAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

AMÉRICA JANETH JAIME REYES

CARRERA:

INGENIERÍA INDUSTRIAL

***“MÉTODOS ESTADÍSTICOS AVANZADOS, ESTOCÁSTICOS Y NO ESTOCÁSTICOS PARA LA
EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES EN LA FIJACIÓN DE NITRÓGENO EN
UN ENTORNO BIOMECATRÓNICO DE LA AGRICULTURA VERTICAL.”***

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLON DE ARTEAGA



Nombre del asesor externo:

I.I Luis Bryant Díaz Andrade

Nombre del asesor Interno:

Dra. Nivia Iracemi Escalante García

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes., a 06 de diciembre de 2024

I.1 Agradecimientos.

*“Era como si se me abriera un mundo nuevo, el mundo de la ciencia, que por fin se me permitía conocer con toda libertad”
(Marie Curie)*



En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la salud y fortaleza necesarias para alcanzar esta meta. A mis padres, les expreso mi gratitud infinita por su apoyo incondicional, tanto emocional como económico y mental a lo largo de toda mi carrera. Su respaldo ha sido fundamental para lograr esto.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores, quienes, con su conocimiento, dedicación y orientación, me guiaron en el camino del aprendizaje. A mis amigos, Kevin, Juan Ricardo, Evelyn, Yenifer y Valeria, gracias por su constante apoyo, su compañía en los momentos difíciles y por ser una fuente de motivación y aliento, les agradezco por su colaboración, por compartir experiencias y por ser parte de este viaje hacia el logro de mis objetivos. Cada uno de ustedes ha sido clave en este proceso.

Gracias a mis asesores, Luis Bryant Díaz Andrade y la Dra. Nivia Iracemi Escalante García, por su guía, apoyo y dedicación durante el desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos, paciencia y compromiso fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados. Sus consejos y enseñanzas no solo enriquecieron este trabajo, sino que también marcaron un impacto positivo en mi desarrollo personal y académico.

Estoy profundamente agradecida con todos los antes mencionados, por la confianza y por ser una fuente constante de motivación. Este logro no habría sido posible sin su valiosa contribución.

Con aprecio y respeto, América.

I.2 Resumen.

El presente estudio como objetivo principal aplicar herramientas estadísticas avanzadas para analizar la fijación de nitrógeno en sistemas de agricultura vertical. Este estudio combina técnicas estadísticas, modelado estocástico y análisis no estocástico, con el propósito de interpretar las interacciones complejas entre las variables que afectan este proceso y optimizar el rendimiento de los cultivos en entornos controlados.

En el contexto de la agricultura vertical, la fijación de nitrógeno es un proceso clave para garantizar la productividad sostenible, especialmente cuando se combina la producción de cultivos como *Lactuca sativa* y *Medicago sativa*. Así pues, se integra un enfoque biomecatrónico, utilizando una red de sensores y actuadores para controlar parámetros ambientales como la temperatura, la humedad, el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la concentración de dióxido de carbono. A partir de datos recolectados en tiempo real, se busca comprender cómo las interacciones entre estas variables influyen en la fijación de nitrógeno y, en consecuencia, en la calidad y productividad de los cultivos.

La metodología combina experimentación controlada en un sistema de agricultura vertical automatizado con análisis estadístico avanzado. En estos experimentos, se evalúan variables clave, como el contenido de nitrógeno en lechuga, el nitrógeno en las soluciones nutritivas, la biomasa de los cultivos, la eficiencia del fotosistema II (PSII), el pH y la CE de las soluciones. Se consideran seis tratamientos diferentes, de los cuales cinco involucran asociaciones entre *Lactuca sativa* y *Medicago sativa*, mientras que uno sirve como control.

Los resultados esperados incluyen la identificación de las variables más influyentes, la construcción de modelos predictivos confiables, reproducibles y la generación de recomendaciones prácticas para optimizar la fijación de nitrógeno en sistemas agrícolas controlados.

I.3 Índice

CAPÍTULO I. PRELIMINARES.	1
I.1 Agradecimientos.	3
I.2 Resumen.	4
I.3 Índice	5
I.4 Lista de Tablas.	10
I.5 Lista de Figuras.	11
CAPÍTULO II. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	13
II.1 Introducción.	14
II.2 Descripción de LIA y del Puesto o Área del Residente.	15
II.2.1 Misión, Visión, Objetivos y Política de Calidad de la Empresa.....	18
Misión.	18
Visión.....	18
Objetivo General.....	18
Política de Calidad.....	18
II.2.2 Sectores estratégicos a los que está alineado LIA.....	19
II.2.3 Organigrama.	19
II.3 Problemas a Resolver.....	20
II.3.1 Identificación de factores.....	20
II.3.2 Reproducibilidad.....	20
II.3.3 Validez de datos.	20
II.3.4 Pruebas de normalidad.	20
II.4 Justificación.	21
II.5 Objetivos.....	22
II.5.1 Objetivo General:	22

II.5.2 Objetivos Específicos:	22
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.	23
III.1 La Agricultura Vertical.	24
III.1.1 Origen de la agricultura vertical:	24
III.1.2 Generalidades de la agricultura vertical:	25
III.1.3 Principales cultivos en los sistemas de agricultura vertical:	25
III.2 La Hidroponía.	28
III.2.1 Tipos de Hidroponía.	28
III.2.2 Soluciones Nutritivas en Hidroponía.	30
III.3 El Rol del Nitrógeno en el Crecimiento de las Plantas:	31
III.3.1 El Nitrógeno en la Síntesis de Proteínas y la Clorofila:	31
III.4 Fijación del Nitrógeno:	34
III.4.1 Factores que afectan a la fijación de Nitrógeno:	35
III.5 Modelos Estadísticos Aplicados a la Agricultura	38
III.5.1 Tipos de modelos	38
III.5.2 Importancia del uso de modelos en la agricultura:	39
III.5.3 Técnicas de Análisis Estadístico Multivariado	39
III.5.4 Análisis de variancia:	40
III.5.5 Análisis de Covarianza:	40
III.5.6 Análisis de correlación:	40
CAPÍTULO IV. DESARROLLO	42
IV.1 Diagrama General. Metodología.	43
IV.2 Estado del Arte.	44
IV.3 Recolección de Datos.	46
IV.3.1 Mediciones Diarias.	46

IV.3.1.1 pH y CE.	46
IV.3.2 Mediciones Semanales.	46
IV.3.2.1 NO ³⁻ en Solución Nutritiva.	46
IV.3.2.3 Clorofila.	47
IV.3.2.4 Consumo de Agua.	48
IV.3.2.5 Calcio.....	48
IV.3.2.6 Sodio.	49
IV.3.3 Mediciones por Réplica.	49
IV.3.3.1 Calcio en Plantas.....	49
IV.3.3.2 Sodio en Plantas.....	49
IV.3.3.3 NO ³⁻ en Plantas.	50
IV.3.3.4 Peso en Fresco.....	50
IV.3.3.4 Peso en Seco	51
IV.3.3.4 Área Foliar.	51
IV.4 Análisis de Datos.	52
IV.4.1 Limpieza y Organización de Datos.....	52
IV.4.2 Selección y Aplicación de Métodos Estadísticos	52
IV.4.3 Análisis de Relaciones y Tendencias.....	52
IV.4.4 Simulaciones y Modelado Estocástico	52
IV.4.5 Visualización de Resultados.....	53
IV.5 Discusión de Datos.	54
IV.6 Redacción de Resultados.	55
IV.6.1 Selección y Organización de Resultados Relevantes	55
IV.6.2 Elaboración de Tablas y Gráficos	55
IV.6.3 Redacción de un Texto Descriptivo	55

IV.7 Cronograma de Actividades.....	56
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	57
V.1 Estado del Arte.....	58
V.2 Recolección de Datos.....	59
V.2.1 Mediciones Diarias.....	59
V.2.1.1 pH.....	59
V.2.2 Mediciones Semanales.....	60
V.2.2.1 NO ³⁻ en Solución Nutritiva.....	60
V.2.2.2 Clorofila.....	60
V.2.2.3 Consumo de Agua.....	61
V.2.2.4 Calcio.....	62
V.2.2.5 Sodio.....	62
V.2.3 Mediciones por Réplica.....	63
V.4 Análisis de Datos.....	64
V.4.1 pH.....	64
V.4.2 NO ³⁻ en Solución Nutritiva.....	66
V.4.3 Calcio en Solución Nutritiva.....	69
V.4.4 Sodio en Solución Nutritiva.....	71
V.4.5 Clorofila.....	74
V.4.6 Consumo de Agua.....	76
V.4.7 Análisis de Correlación entre Variables.....	79
V.5 Discusión de Datos.....	80
V.5.1 pH.....	80
V.5.2 NO ³⁻ en Solución Nutritiva.....	80
V.5.3 Calcio en Solución Nutritiva.....	80

V.5.4 Sodio en Solución Nutritiva.	80
V.5.5 Clorofila	81
V.5.6 Consumo de Agua.....	81
V.5.7 Análisis de Correlación entre Variables.	81
V.6 Redacción de Resultados.	82
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES	83
VI.1 Conclusiones Generales.	84
CAPÍTULO VII. COMPETENCIAS DESARROLLADAS.....	85
VII.1 Competencias Desarrolladas y/o Aplicadas.	86
CAPÍTULO VIII. FUENTES DE INFORMACIÓN.	87
VIII.1 Bibliografía.....	88
CAPÍTULO IX. ANEXOS.....	91
IX.1 Carta de Aceptación.	92
XI.2 Carta de Liberación.	93
XI.3 Código Palangana	94
XI.4 Código Matriz de Correlación.	96

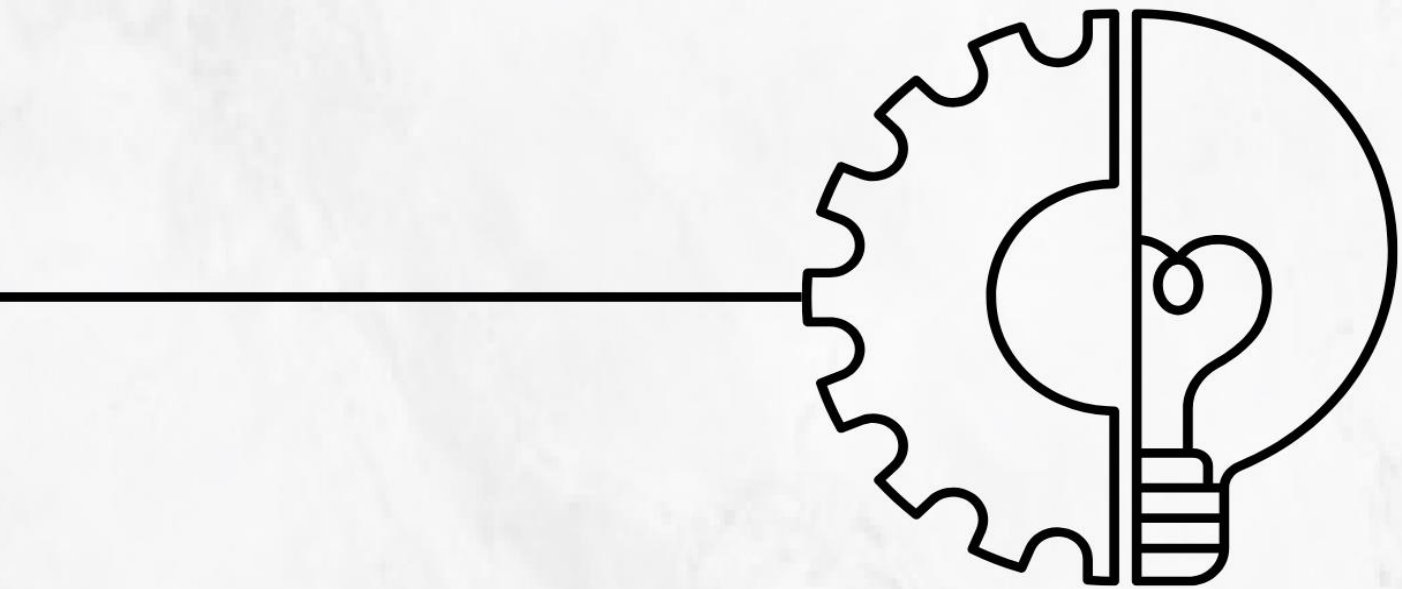
I.4 Lista de Tablas.

Tabla 1. Clasificación de hortalizas cultivadas en granjas verticales	26
Tabla 2 Cronograma de Actividades.	56
Tabla 3 Agrupación de Datos de pH.	64
Tabla 4 Agrupación de Datos de NO ⁻³	66
Tabla 5 Agrupación de Datos de Ca.	69
Tabla 6 Agrupación de Datos de Na.	71
Tabla 7 Agrupación de Datos de CHL.....	74
Tabla 8 Agrupación de Datos de Consumo de Agua.....	76

I.5 Lista de Figuras.

Figura 1. Instalaciones del Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA) en el ITPA.	15
Figura 2. Hortalizas en crecimiento (LIA, 2024).....	17
Figura 3. Organigrama del Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA).	19
Figura 4. Cultivo de agricultura vertical (LIA,2024)	25
Figura 5. Síntomas de deficiencia de nitrógeno en hojas de tomate.	32
Figura 6. Metodología General.	43
Figura 7 Medidor de mesa AQUASEARCHER™ AB33M1	46
Figura 8 MEDIDOR DE NITRATOS LAQUATWIN NO311	47
Figura 9 SPAD-502 Plus 2900P-C”	47
Figura 10 Tina Tipo Palangana.	48
Figura 11 MEDIDOR DE CALCIO LAQUATWIN Ca11.....	48
Figura 12 MEDIDOR DE SODIO LAQUATWIN Na11	49
Figura 13 OHAUS Adventurer® Balanza	50
Figura 14 Horno de Convección Forzada BINDER.57L.....	51
Figura 15 pH.....	59
Figura 16 NO ₃ - en los tratamientos.....	60
Figura 17 Clorofila en los tratamientos	60
Figura 18 Consumo de agua	61
Figura 19 Calcio en los tratamientos.....	62
Figura 20 Sodio en los tratamientos	62
Figura 21 Diferencias para las medias de los tratamientos pH.....	64
Figura 22 Intervalos para los tratamientos pH.	65
Figura 23 Gráfica de Caja para pH	65
Figura 24 Gráfica de Residuos de pH.....	66
Figura 25 Diferencias para las medias de los tratamientos NO ₃	67
Figura 26 Intervalos para los tratamientos NO ₃	67
<i>Figura 27 Gráfica de Caja para NO₃.</i>	<i>68</i>
Figura 28 Gráfica de Residuos de NO ₃	68
Figura 29 Diferencias para las medias de los tratamientos Ca.....	69
Figura 30 Intervalos para los tratamientos Ca.	70

Figura 31 Gráfica de Caja para Ca.	70
Figura 32 Gráfica de Residuos de Ca.	71
Figura 33 Diferencias para las medias de los tratamientos Na.	72
Figura 34 Intervalos para los tratamientos Na.	72
Figura 35 Gráfica de Caja para Na.	73
Figura 36 Gráfica de Residuos de Na.	73
Figura 37 Diferencias para las medias de los tratamientos CHL.	74
Figura 38 Intervalos para los tratamientos CHL.	75
Figura 39 Gráfica de Caja CHL.	75
Figura 40 Gráfica de Residuos de CHL.	76
Figura 41 Diferencias para las medias de los tratamientos Consumo de Agua. .	77
Figura 42 Intervalos para los tratamientos Consumo de Agua.	77
Figura 43 Gráfica de Caja Consumo de Agua.	78
Figura 44 Gráfica de Residuos de Consumo de Agua.	78
Figura 45 Matriz de Correlación entre Variables.	79
Figura 46 Carta de Aceptación.	92
Figura 47. Carta de Liberación.	93
Figura 48 Palangana de Plástico.	95



CAPÍTULO 2:

GENERALIDADES DEL
PROYECTO

II.1 Introducción.

Se prevé que casi 600 millones de personas padezcan subalimentación crónica en 2030, lo que pone de relieve el inmenso reto que supone alcanzar la meta de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de erradicar el hambre. El incremento poblacional y sus requerimientos de alimento y espacio han propiciado una mayor demanda del suelo y, con ello, presiones más intensas para cambiar su vocación natural hacia otros usos. Entre sus efectos más importantes se encuentra la pérdida de la materia orgánica del suelo, lo que impide el desarrollo de las estructuras de los horizontes superficiales del mismo y los hace más susceptibles a la erosión y degradación (FAO, 2023).

Para la misma organización, (FAO, 2023), cuando existe seguridad alimentaria significa que todas las personas tienen, en todo momento, acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos, que satisfacen sus necesidades energéticas diarias y preferencias alimentarias para llevar una vida activa y sana. Esta definición enfatiza la complejidad asociada con el término “Seguridad Alimentaria”, resaltando la necesidad de abordarlo mediante la integración de múltiples y diversas perspectivas.

II.2 Descripción de LIA y del Puesto o Área del Residente.

En el año 2017 se creó el Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA) dentro del Tecnológico Nacional de México campus Pabellón de Arteaga gracias al apoyo recibido por parte de la Convocatoria de Infraestructura Científica y Tecnológica del CONACyT (INFRA-2016-01, Project No. 270665). Los fundadores del Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA) son la Dra. Nivia Iracemi Escalante García y el Dr. José Ernesto Olvera González. En la ilustración 1 se presenta la infraestructura física de LIA.



Figura 1. Instalaciones del Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA) en el ITPA.

La adquisición de equipamiento en LIA se ha ido consolidando a través de diferentes apoyos federales y estatales tal es el caso de la Convocatoria de Infraestructura Científica y Tecnológica del CONACyT, la Convocatoria de Investigación Científica Básica 2016 que tuvo como objetivo apoyar únicamente propuestas de investigación científica básica que generen conocimiento de frontera y contribuyan a

mejorar la calidad de la educación superior y a la formación de científicos y académicos siendo el proyecto 287818 titulado “Caracterización de la Radiación Artificial Pulsada y MultiEspectral con Tecnología LED para Incrementar el Potencial Biológico de Plantas con Interés Agronómico”.

Además de otros apoyos que se han gestionado con Gobierno Estatal y Recursos Federales, inclusive algunas Empresas Privadas enfocadas al sector agroindustrial. Cabe destacar que el equipamiento encontrado en LIA permite que sea competente a nivel internacional. Los Sistemas de Radiación Artificial Multiespectral a base de LEDs, así como la Configuración de los Sistemas de Desinfección han sido diseñados, desarrollados e implementados dentro y fuera de LIA.

Es prudente mencionar que LIA es el único el único laboratorio en el país especializado en iluminación artificial enfocado al uso de la radiación artificial multiespectral para el desarrollo de proyectos e investigación del sector agroindustrial. Se cuentan con cuatro líneas de investigación y desarrollo tecnológico:

1. Sistemas de radiación artificial para cultivo de plantas:
 - a. Diseño, construcción e implementación de sistemas de producción multinivel en espacios cerrados con luz artificial LED que permiten potenciar el contenido nutrimental de cultivos como microgreens, lechuga, lenteja, espinaca, albahaca, alfalfa, entre otras, a través de recetas de luz (diferentes combinaciones de color).
2. Sistemas de desinfección para productos del sector agroindustrial:
 - a. Desarrollo de Sistemas de desinfección de alimentos con radiación ultravioleta LED tipo A, B y C aplicados a productos agroindustriales y en fresco.
3. Estrategias de luz para conservar y/o incrementar la vida de anaquel en productos frescos:
 - a. Implementar estrategias tecnológicas con luz artificial tipo LED para preservar, extender y/o acelerar el tiempo de vida en almacén de frutas y verduras, además de analizar el efecto sobre la biosíntesis de compuestos (licopeno, capsaicina, entre otros.) durante su estancia en anaquel.

4. Monitoreo y detección de plagas/enfermedades en cultivos:

- a. Investigación, integración y aplicación de la agricultura de precisión con el uso de tecnología aérea no tripulada (VANTs) para el monitoreo y detección de plagas en diferentes cultivos con el objetivo de evitar pérdidas en la producción.

Se ha experimentado con la producción de alimentos en ambientes artificiales y cerrados en donde se sustituye la luz solar por artificial con colores específicos (recetas de colores), para que las plantas se desarrollen de acuerdo con necesidades específicas. Impactando directamente a la soberanía alimentaria. De igual forma, ha recibido invitaciones para poder demostrar, como la tecnología puede trasladarse a comunidades como un sistema sustentable, donde se puedan incluir paneles solares, captación de agua, y así todos los elementos por medio de un manual puedan y tengan una forma de producir alimentos y que de una manera logren ser autosuficientes, impactando directamente en los problemas de Seguridad Alimentaria.



Figura 2. Hortalizas en crecimiento (LIA, 2024)

II.2.1 Misión, Visión, Objetivos y Política de Calidad de la Empresa.

Misión.

Proyectar e impulsar el desarrollo de nuevas actividades en el sector agroindustrial a través de procedimientos que ayuden a mejorar la calidad de vida alrededor del mundo, generando productos agroalimentarios con valor agregado.

Visión.

Ser un centro capaz de impulsar, desarrollar y fortalecer iniciativas que incentiven la productividad y rentabilidad agroalimentaria; generando en el sector agroindustrial nuevas filosofías de competitividad y calidad.

Objetivo General.

Profundizar y clarificar los fenómenos no explicados hasta el momento sobre los efectos de la luz (continua y pulsada) en plantas y alimentos como su caracterización biológica con herramientas tecnológicas actuales LEDs, siendo un centro capaz de poseer el nivel de competitividad que otros laboratorios existentes en el mundo.

Política de Calidad.

El TecNM establece el compromiso de implementar y orientar todos sus procesos estratégicos y actividades del proceso educativo, hacia la Calidad del Servicio Educativo y respeto del medio ambiente, dando cumplimiento a los requisitos del estudiante y partes interesadas, legislación ambiental aplicable y otros requisitos ambientales que se suscriban así como promover en su personal, estudiantes y partes interesadas la prevención de la contaminación y el uso racional de los recursos; mediante la implementación, operación y mejora continua de un Sistema de Gestión de Calidad conforme a la Norma ISO 9001:2015/NMX-CC-9001-IMNC-2015 y un Sistema de Gestión Ambiental conforme a la Norma ISO 14001:2015/NMX-SAAIMNC-14001-2015, coadyuvando a la conformación de una sociedad justa y humana con una perspectiva de sustentabilidad y ser uno de los pilares fundamentales del desarrollo sostenido y sustentable.

II.2.2 Sectores estratégicos a los que está alineado LIA.

- i. PND 2019-2024 (Autosuficiencia alimentaria, Ciencia y Tecnología).
- ii. PED 2016-2022 del Estado de Aguascalientes (Agroalimentaria, Electrónica y TIC's).
- iii. La agenda de Innovación para el Estado de Aguascalientes (Conacyt).
- iv. Agenda 2030 de la ONU (objetivos 2, 11 y 12).

II.2.3 Organigrama.

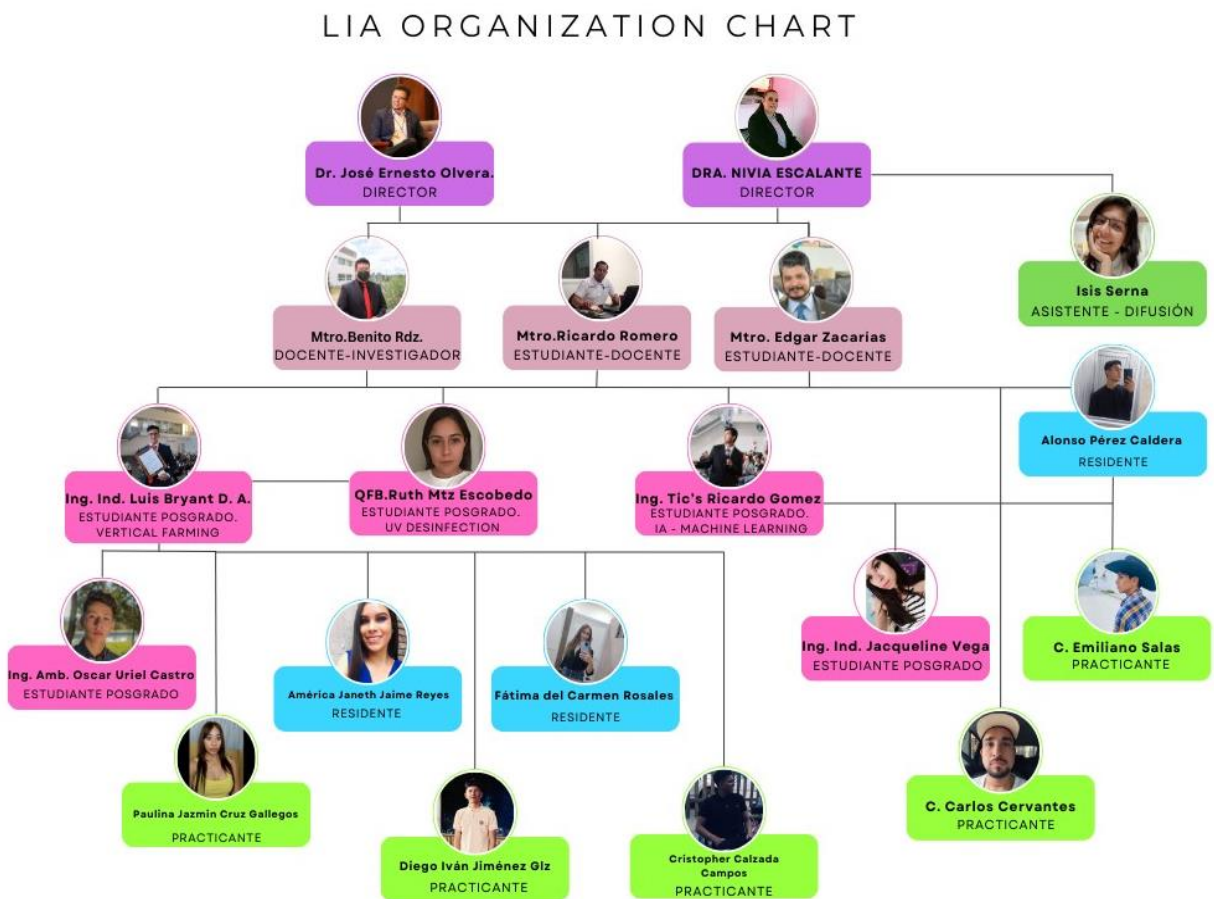


Figura 3. Organigrama del Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA).

II.3 Problemas a Resolver.

Todos los problemas a resolver serán enmarcados y desarrollados de acuerdo al tiempo y ejecución del proyecto.

II.3.1 Identificación de factores.

Se desea conocer los factores que afectan y/o benefician al experimento, cómo estos se correlacionan entre sí y cómo se pueden combinar para lograr hacer una sinergia entre lo que es benéfico y lo que no.

II.3.2 Reproducibilidad.

El experimento tiene que llegar a demostrar que es reproducible, ósea, que cuente con la capacidad de obtener los mismos resultados en el presente experimento y en otros.

II.3.3 Validez de datos.

Se pretende adaptar todos los resultados de tal manera que estos sean válidos para que sean reportables. Así como comprobar con análisis estadísticos que estos últimos se adaptan al punto anterior. También se podría imputar valores faltantes en las mediciones de los sensores utilizando métodos estadísticos apropiados.

II.3.4 Pruebas de normalidad.

Realizar pruebas de Shapiro-Wilk o Kolmogórov-Smirnov en los datos imputados para determinar si los valores de pH y CE se distribuyen normalmente.

II.4 Justificación.

El presente estudio es de suma importancia debido a su potencial para optimizar procesos productivos en sistemas de agricultura vertical. La fijación de nitrógeno es un factor crítico en la eficiencia de los sistemas de cultivo, y su correcta gestión tiene un impacto directo en la productividad y en la reducción de costos operativos. Se buscará maximizar la eficiencia en la utilización de recursos como nutrientes, agua, energía y espacio, y este estudio ofrecerá una plataforma para aplicar herramientas estadísticas avanzadas que permitan mejorar estos indicadores.

Al aplicar métodos estadísticos estocásticos y no estocásticos, se pretende modelar las interacciones complejas entre variables como temperatura, humedad, pH, concentración de CO₂ y la composición de las soluciones nutritivas. La comprensión de estas interacciones es fundamental para establecer patrones de comportamiento que permitan la mejora continua del sistema productivo, lo que resulta en una mayor predictibilidad y control de los resultados, características esenciales para la gestión eficiente de cualquier proceso industrial.

Además, la optimización de la fijación de nitrógeno dentro de un entorno biomecatrónico automatizado reduce la variabilidad en la producción y minimiza el desperdicio de recursos. Este enfoque está alineado con los principios de la ingeniería industrial, como la estandarización, la reducción de la variabilidad y el uso eficiente de los insumos. En consecuencia, este proyecto no solo tiene implicaciones directas para la mejora del rendimiento agrícola, sino también para la implementación de prácticas sostenibles que promuevan la producción intensiva con un menor impacto ambiental y una alta rentabilidad.

En conclusión, estudio contribuye al diseño de procesos más eficientes y optimizados en la agricultura vertical, haciendo uso de herramientas estadísticas que permiten una toma de decisiones informada y basada en datos. Esto resulta en mejoras en la cadena de valor agrícola y un incremento en la competitividad de los sistemas de producción sustentable.

II.5 Objetivos

II.5.1 Objetivo General:

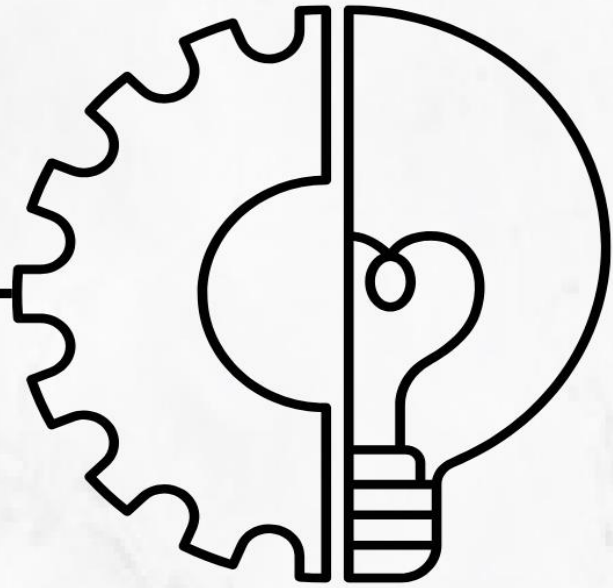
Aplicar métodos estadísticos avanzados para analizar la fijación de nitrógeno en un entorno biomecatrónico de agricultura vertical, utilizando tanto modelos estocásticos como no estocásticos para evaluar la variabilidad de los datos experimentales.

II.5.2 Objetivos Específicos:

i. Evaluar la eficacia de diferentes variables ambientales y de manejo sobre la fijación de nitrógeno en sistemas de agricultura vertical mediante técnicas estadísticas como ANOVA, ANCOVA y análisis de correlación, asegurando una interpretación precisa de las interacciones entre las variables.

ii. Implementar análisis estocásticos para modelar la incertidumbre y la aleatoriedad en la fijación de nitrógeno, utilizando simulaciones y distribuciones probabilísticas que permitan predecir resultados bajo diferentes condiciones ambientales y operativas.

iii. Optimizar el diseño experimental en la investigación de la fijación de nitrógeno mediante la identificación de variables críticas, empleando técnicas estadísticas no estocásticas para reducir la varianza y mejorar la fiabilidad de las conclusiones sobre el entorno biomecatrónico.



CAPÍTULO 3:

MARCO TEÓRICO

A continuación, se exponen los fundamentos teóricos que sustentan este proyecto, desarrollados con base en los objetivos planteados y orientados a garantizar su cumplimiento.

III.1 La Agricultura Vertical.

III.1.1 Origen de la agricultura vertical:

Durante mucho tiempo, los pueblos indígenas de América del Sur han empleado técnicas de cultivo en capas verticales para la producción de alimentos, y en Asia Oriental, las terrazas de arroz siguen un enfoque similar. El término "agricultura vertical" fue acuñado por Gilbert Ellis Bailey, un estadounidense que fue profesor de geología en la Universidad del Sur de California, y publicó el primer libro sobre el tema, titulado "Vertical Farming", en 1915 (Bailey 1915). Desde entonces, arquitectos y científicos han explorado esta idea, especialmente a finales del siglo XX, debido al crecimiento constante de la población y la creciente presión sobre los recursos para la producción de alimentos (Despommier 2020).

La agricultura vertical surgió como una solución a la necesidad de las ciudades de establecer cultivos para asegurar la autosuficiencia alimentaria. Su origen se remonta al siglo XIX, específicamente en Alemania durante la revolución industrial (FAO 2016).

Básicamente, la agricultura vertical implica cultivar plantas en capas apiladas en posición vertical. Esta técnica agrícola tiene como objetivo maximizar el uso del espacio de cultivo al aumentar la superficie disponible en el suelo, lo que permite generar más plantas en un espacio reducido. Además, puede adaptarse a diferentes métodos de horticultura existentes, como la hidroponía a pequeña escala o la agricultura en ambientes controlados a gran escala.

Asimismo, presenta el potencial de generar cosechas durante todo el año prácticamente en cualquier ubicación, siempre y cuando se combinen las técnicas apropiadas (Wallace 2023).

III.1.2 Generalidades de la agricultura vertical:

La agricultura vertical tiene la capacidad de incrementar la producción en un rango del 40% al 100% en comparación con los métodos convencionales. Ha surgido como una perspectiva altamente prometedora en la esfera agrícola debido a su habilidad para optimizar de manera más efectiva el uso del espacio y los recursos limitados disponibles. Este método agrícola implica el cultivo de plantas en estructuras apiladas, como torres o estantes, dentro de ambientes controlados como invernaderos o instalaciones hidropónicas (Agricultura 2016).



Figura 4. Cultivo de agricultura vertical (LIA,2024)

III.1.3 Principales cultivos en los sistemas de agricultura vertical:

En la actualidad, las variedades de plantas más frecuentemente cultivadas en sistemas de agricultura vertical son la lechuga, la col rizada, la albahaca, el cebollín, la menta y las fresas (Frąckiewicz 2023).

Hortalizas cultivadas en la agricultura vertical:

La agricultura vertical puede implementarse en zonas consideradas nulas para la agricultura tradicional, de manera que hoy en día gracias a esta tecnología se pueden cultivar las siguientes especies (Agrotendencia 2019).

Tabla 1. Clasificación de hortalizas cultivadas en granjas verticales. (Álvaro 2020).

1. Hortalizas de hoja	2. Hortalizas de tallo	3. Hortalizas de frutos
Acelga <i>Beta vulgaris L.</i> Berro <i>Nasturtium officinale</i> Cebollín <i>Allium cepa</i> Lechuga <i>Lactuca sativa L.</i> Espinaca <i>Spinaca oleracea L.</i> Repollo <i>Brassica oleracea L.</i> Rúcula <i>Eruca Sativa</i>	Apio <i>Apium graveolens</i> Esparrago <i>Asparagus officinalis</i> Ruirbarbo <i>Rheum rhabarbarum</i>	Ají <i>Capsicum chinense</i> Berenjena <i>Solanum melongena</i> Calabacín <i>Cucurbita pepo</i> Pepino <i>Cucumis sativus</i> Pimentón <i>Capsicum annum</i> Tomate <i>Solanum lycopersicum</i>

Ventajas y retos de la agricultura vertical en comparación con la agricultura tradicional:

Existen numerosas ventajas asociadas a este tipo de cultivos en comparación con la agricultura tradicional. Estas ventajas incluyen:

- a. Mayor rendimiento por metro cuadrado cultivable, gracias a la capacidad de alojar más plantas en diferentes niveles de cultivo.
- b. Capacidad de eliminar la dependencia de las estaciones del año mediante el control tecnológico de las condiciones climáticas.
- c. Menor consumo de agua, gracias a la amplia gama de sistemas de riego y métodos de plantación alternativos que se utilizan en esta forma de agricultura.
- d. Este enfoque promete reducir el uso de pesticidas en la producción, ya que se lleva a cabo en entornos interiores que carecen de plagas, lo que a su vez mejora la salud pública y aumenta la producción de alimentos de origen orgánico (Aecoc 2023).

Desventajas de la agricultura vertical:

- a. Altos costos de implementación. La implementación de la agricultura vertical demanda una inversión inicial considerable en infraestructura y tecnología, como, por ejemplo, sistemas de iluminación artificial, sistemas automáticos de riego y estructuras de soporte. Estos gastos pueden resultar inaccesibles para agricultores de pequeña escala o para comunidades con recursos limitados (Novagric 2022).
- b. Dependencia de la energía: El uso de dispositivos como sistemas de iluminación artificial, ventilación y otros equipos esenciales en la agricultura vertical implica un considerable gasto energético. Esto puede generar costos elevados en la factura eléctrica y contribuir a una mayor emisión de carbono por parte del sistema agrícola, lo cual no favorece la promoción de la sostenibilidad ni la reducción del impacto ambiental, objetivos que resultan poco deseables (Novagric 2022).

III.2 La Hidroponía.

Es un método de cultivo que utiliza el agua como principal fuente de absorción de nutrientes en las plantas. Los sistemas hidropónicos típicamente emplean una solución rica en nutrientes que contiene los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno y fósforo, junto con luz artificial. Estos sistemas hidropónicos varían en tamaño, desde pequeños dispositivos que caben en una encimera de cocina hasta almacenes diseñados para la producción de alimentos destinados al mercado.

Además, la hidroponía permite un control preciso de los nutrientes y las condiciones ambientales, lo que se traduce en un crecimiento más rápido y una mayor eficiencia en el uso de recursos. Las plantas pueden recibir la cantidad exacta de nutrientes que necesitan, lo que minimiza el desperdicio y reduce la necesidad de fertilizantes químicos. Además, al cultivar en sistemas cerrados, se reduce la pérdida de agua por evaporación y el riesgo de enfermedades del suelo, lo que hace que la hidroponía sea una opción más sostenible (Agrotendencia 2020).

III.2.1 Tipos de Hidroponía.

A continuación, se describen los principales tipos de sistemas hidropónicos y sus respectivas características, según productores, agricultores e investigadores, (Okemwa, 2015; Nguyen et al., 2016; Lopes et al., 2008)

1. Cultivo de aguas profundas (DWC):

En este cultivo, las raíces de las plantas se suspenden en agua rica en nutrientes y se les proporciona aire directamente mediante una piedra difusora. El sistema de baldes hidropónicos es un ejemplo clásico de este sistema. Las plantas se colocan en macetas de red y las raíces se suspenden en una solución nutritiva donde crecen rápidamente en una gran masa. Es obligatorio controlar las concentraciones de oxígeno y nutrientes, la salinidad y el pH (Domingues et al., 2012) ya que las algas y los mohos pueden crecer rápidamente en el depósito. Este sistema funciona bien para plantas más grandes que producen frutos, especialmente pepinos y tomates, que crecen bien en este sistema.

2. Sistema de goteo:

En este sistema, la solución nutritiva se almacena en un depósito y las plantas se cultivan por separado en un medio sin suelo. El agua o la solución nutritiva del depósito se suministra a las raíces de cada planta en la proporción adecuada con la ayuda de una bomba (Raphael y Colla, 2005). Los sistemas de goteo dispensan nutrientes a un ritmo muy lento, a través de boquillas, y las soluciones sobrantes se pueden recoger y recircular, o incluso se pueden dejar drenar. Con este sistema, es posible cultivar simultáneamente varios tipos de plantas.

3. Flujo y reflujo:

Este es el primer sistema hidropónico comercial que funciona según el principio de inundación y drenaje. Este sistema utiliza una bandeja de cultivo y un depósito que se llena con una solución nutritiva. Una bomba inunda periódicamente la bandeja de cultivo con solución nutritiva, que luego se drena lentamente. Es posible cultivar diferentes tipos de cultivos, pero el problema de la pudrición de las raíces, las algas y el moho es muy común (Nielsen y otros., 2006) por lo tanto, se requiere algún sistema modificado con unidad de filtración.

4. Técnica de película de nutrientes (NFT):

El Dr. Alen Cooper desarrolló la técnica de película nutritiva (NFT) a mediados de los años 60 en Inglaterra para superar las deficiencias del sistema de flujo y reflujo. Al igual que la aeroponía, la técnica de película nutritiva (NFT) es el sistema hidropónico más popular. En este método, se bombea una solución nutritiva constantemente a través de canales en los que se colocan las plantas (Domingues y otros., 2012). Cuando las soluciones nutritivas llegan al final del canal, se envían de regreso al inicio del sistema. Esto lo convierte en un sistema de recirculación, pero a diferencia del DWC, las raíces de las plantas no están completamente sumergidas, lo que es la razón principal para nombrar a este método NFT.

5. Sistema de mecha:

Este es el sistema hidropónico más simple que no requiere electricidad, bombas ni aireadores (Shrestha y Dunn, 2013). Las plantas se colocan en un medio absorbente como fibra de coco, vermiculita o perlita con una mecha de nailon que va desde las raíces

de la planta hasta un depósito de solución nutritiva. El agua o la solución nutritiva se suministra a las plantas a través de la acción capilar. Este sistema funciona bien para plantas pequeñas, hierbas y especias.

III.2.2 Soluciones Nutritivas en Hidroponía.

Una solución nutritiva para sistemas hidropónicos es una solución acuosa que contiene principalmente iones inorgánicos provenientes de sales solubles de elementos esenciales para las plantas superiores. Eventualmente, pueden estar presentes algunos compuestos orgánicos como quelatos de hierro (Steiner, 1968).

Un elemento esencial tiene un papel fisiológico claro y su ausencia impide el ciclo de vida completo de la planta (Taiz & Zeiger, 1998). Actualmente 17 elementos son considerados esenciales para la mayoría de las plantas, estos son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno, boro, cloro y níquel (Salisbury & Ross, 1994).

Con excepción del carbono (C) y el oxígeno (O), que son aportados desde la atmósfera, los elementos esenciales se obtienen del medio de crecimiento. Otros elementos como el sodio, silicio, vanadio, selenio, cobalto, aluminio y yodo, entre otros, se consideran beneficiosos porque algunos de ellos pueden estimular el crecimiento, o pueden compensar los efectos tóxicos de otros elementos, o pueden reemplazar nutrientes esenciales en un papel menos específico (Trejo-Téllez et al., 2007).

Las soluciones nutritivas más básicas consideran en su composición solo nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre; y se complementan con micronutrientes. La composición de nutrientes determina la conductividad eléctrica y el potencial osmótico de la solución.

III.3 El Rol del Nitrógeno en el Crecimiento de las Plantas:

El nitrógeno es uno de los nutrientes determinantes del crecimiento y desarrollo de los cultivos, que, si no se consumen en cantidades suficientes, limitan el crecimiento de las plantas (Fathi et al., 2013). Por otra parte, se ha reportado que el consumo excesivo de N en el suelo produce un efecto negativo en el crecimiento y producción de los cultivos (Valentinuz & Tollenaar, 2006).

El nitrógeno es uno de los componentes esenciales, junto a los amino ácidos, las proteínas y los ácidos nucleicos. Su deficiencia retrasa el desarrollo fenológico en las etapas vegetativas y reproductivas (Fathi & Zeidali, 2021). La aplicación de cantidades adecuadas de fertilizantes nitrogenados puede aumentar la biomasa significativamente y también, altos volúmenes de biomasa son solo posibles si existe fertilización con nitrógeno (Fathi et al., 2016).

III.3.1 El Nitrógeno en la Síntesis de Proteínas y la Clorofila:

El nitrógeno forma parte de las proteínas, enzimas y clorofila, por tanto, es esencial en los procesos de síntesis de proteínas y en la fotosíntesis. Entre sus funciones también destaca el aceleramiento de la división celular, y la elongación de las raíces. Una planta con carencia de nitrógeno no podrá completar procesos metabólicos indispensables para su desarrollo.

Interviene en la división celular y en muchos otros procesos, como la producción de clorofila, sin la cual la fotosíntesis no es posible. Además, juega un papel importante en la producción de azúcares, almidón y lípidos, entre otras sustancias, para la nutrición y otros procesos básicos de las plantas.

Clorofila:

El N es uno de los componentes principales de la clorofila y la proteína en las células de las plantas. El contenido de clorofila es vital para determinar la velocidad de la fotosíntesis y la producción de materia seca. El contenido de N y el contenido de clorofila en las plantas están estrechamente relacionados, ya que el 70% del nitrógeno de las

hojas se acumula en los cloroplastos, los cuales producen los pigmentos de la clorofila (Fathi & Zeidali, 2021; Moeinirad et al., 2021).

El nitrógeno es el elemento que las plantas necesitan por mayor cantidad con respecto a otros, es el constituyente principal de diversos componentes celulares, como aminoácidos y ácidos nucleicos.

Por lo tanto, una insuficiencia de nitrógeno inhibe de manera drástica e inmediata el crecimiento vegetal, si dicha carencia persiste, las hojas de las plantas sufrirán clorosis (amarilleo de las hojas: condición en la que el follaje produce insuficiente clorofila, debido eso, las hojas no tienen una coloración verde, sino verde claro a amarilla) especialmente en las hojas más viejas cerca de la base de la planta.



Figura 5. Síntomas de deficiencia de nitrógeno en hojas de tomate. (Epstein&Bloom, 2004, tomada de Taiz&Zeiger, *Plant Physiology* 2002.)

Cuando la deficiencia de nitrógeno es más severa, las hojas se llegan a poner completamente amarillas y se acaban cayendo de la planta, en las hojas más jóvenes no se suelen observar los síntomas de la clorosis porque el nitrógeno se llega a movilizar desde las hojas más viejas, debido a eso, cuando una planta sufre de esta deficiencia puede tener un color verde brillante en las hojas superiores y amarillento en las hojas inferiores.

Si la carencia de nitrógeno evoluciona lentamente, las plantas pueden presentar problemas de crecimiento, es decir, se presentan tallos muy delgados y leñosos, esto se debe a la producción de un exceso de carbohidratos que no se utilizan en la síntesis de aminoácidos o de otros compuestos derivados de nitrógeno. Estos azúcares que no se emplearon en el metabolismo del nitrógeno se dirigen a la síntesis de antocianidinas, compuestos fenólicos que tienen características de un pigmento de coloración morada,

provocando entonces que las hojas, tallos y peciolo adquieran esta coloración, el caso es muy frecuente en especies como tomate o en variedades del maíz.

III.4 Fijación del Nitrógeno:

El nitrógeno es un elemento muy importante en la biosfera, donde se encuentra enlazado a los átomos de otros elementos, formando parte de las proteínas y otros constituyentes de los seres vivos. El nitrógeno es pues otro elemento esencial para el desarrollo de los seres vivos. Las plantas lo incorporan su organismo, sintetizando así sus propias proteínas (proteínas vegetales).

En cultivos su abundancia da lugar a mejores rendimientos y a productos más nutritivos. Las plantas no pueden asimilar directamente el nitrógeno atmosférico (N_2), sino que el nitrógeno disponible para las plantas ha de estar bajo lo que se conoce como formas iónicas del nitrógeno, normalmente como ion nitrato, NO_3^- . Por esto, será necesaria la conversión del nitrógeno atmosférico en formas iónicas que puedan ya ser asimiladas por las plantas. Esta conversión se denomina fijación biológica del nitrógeno y tiene lugar de forma natural únicamente mediante la acción de ciertas algas y bacterias. Tales son las bacterias que están asociadas a las raíces de las plantas leguminosas (judía, guisante, alfalfa, etc.), que son capaces de convertir el N_2 en nitratos.

Por otra parte, cuando se administra al suelo como ion amonio, las bacterias nitrificantes lo convierten en ion nitrato, con lo que ya es disponible para las plantas, aunque algunas (como el arroz) lo pueden tomar directamente del ion amonio. Hay que tener cuidado, no obstante, con el exceso en el suelo del nitrato asimilable, pues existen plantas que si lo contienen en altas concentraciones pueden resultar tóxicas para los rumiantes e, incluso, para el hombre.

Siendo la atmósfera tan rica en nitrógeno elemental, N_2 , el ideal sería que éste se convirtiera en nitrógeno asimilable por las plantas. Esto es lo que se ha conseguido con la química, como se tratará seguidamente, pero antes de esto los agricultores lo conseguían a través de unos intermediarios, las legumbres o leguminosas. Éstas son plantas que contienen en los nódulos de sus raíces unas bacterias (del género *Rhizobium*) capaces de fijar el nitrógeno atmosférico, con lo cual el cultivo intensivo con leguminosas deja enriquecidos los suelos con nitrógeno asimilable (según se ha

calculado, unos 11 Kg por hectárea y por año). En esto se basa la rotación de cultivos, alternando la siembra de leguminosas con plantas consumidoras de nitrógeno.

Los procesos comentados hasta ahora son todos naturales. Sin embargo, debido al constante crecimiento de la población se hizo necesario producir más alimentos. Los abonos naturales resultaron insuficientes, por lo que se añadió más nitrógeno fijado a los cultivos, pero obtenido por procesos químicos provocados. Esto pudo hacerse cuando se consiguió convertir el nitrógeno atmosférico en amoníaco. Ésta es la fijación química del nitrógeno. A partir del amoníaco ya se obtienen fácilmente nitratos y sales amónicas (fertilizantes) para ser agregados a los campos.

III.4.1 Factores que afectan a la fijación de Nitrógeno:

Existen una serie de factores que afectan a la cantidad de nitrógeno fijado, la mayoría de los cuales afectan tanto a la fijación por microorganismos libres como en simbiosis. Algunos factores son: número de microorganismos fijadores, la luz, la temperatura, la humedad, la concentración de oxígeno, compuestos de nitrógeno, otros nutrientes minerales y reguladores de la nitrogenasa.

A continuación, se describe cuál es el efecto de cada uno de ellos.

La concentración de oxígeno:

Cuando aumenta la concentración de oxígeno se observa una disminución de la fijación del nitrógeno. Esto es así porque el proceso de fijación exige condiciones reductoras. Ante la presencia de oxígeno (presencia que será obligada en los microorganismos aerobios) se produce un gasto considerable de poder reductor para proteger a la nitrogenasa del oxígeno.

Los compuestos de nitrógeno:

La síntesis de la nitrogenasa es inhibida por la presencia en el medio de concentraciones de compuestos de nitrógeno, tales como amonio o nitratos. Además, interfieren en la competición entre fijadores de nitrógeno y no fijadores.

Reguladores de la actividad de la nitrogenasa: El ADP es un potente inhibidor de la nitrogenasa. Cuando la relación ATP/ADP es igual o inferior a 0.5, la nitrogenasa queda totalmente inhibida. Inhibidores competitivos son el acetileno y el CO, por los que la nitrogenasa presenta mayor afinidad que por el nitrógeno.

La actividad de la nitrogenasa se ve incrementada con:

- a. Un pH cercano a la neutralidad.
- b. Un nivel alto de humedad y baja tensión de oxígeno.
- c. Abundante cantidad de compuestos carbonados y compuestos energéticos (ATP).
- d. Baja concentración de compuestos de nitrógeno.

Hay varios factores ambientales que limitan la fijación del nitrógeno. La nodulación se ve afectada por el exceso o carencia en determinados elementos minerales. Un defecto de Molibdeno influye negativamente en la fijación del nitrógeno. Otro elemento mineral es el Hierro, que sin embargo cuando escasea no tiene un efecto directo sobre la fijación del nitrógeno. El Hierro y el Molibdeno son elementos constituyentes de la nitrogenasa.

La temperatura también es un factor ambiental limitante que afecta de forma indirecta. La presencia de altas temperaturas incrementa la respiración; esto hace que el carbono disponible para la simbiosis sea menor. Con temperaturas inferiores a los 7°C la nodulación es inexistente y en el caso extremo de altas temperaturas, la probabilidad de nodulación es menor, debido a la reducción de los pelos radiculares.

El agua y la luz afectan también a la simbiosis. Cuando la disponibilidad de agua es baja, la fijación del nitrógeno es menor; mientras que la luz influye indirectamente a través de la fotosíntesis. La fotosíntesis produce los carbohidratos necesarios para el desarrollo y funcionamiento del nódulo.

Otros factores limitantes que actúan en menor medida son las enfermedades como hongos o virus y la diferente concentración de gases que hay en el terreno. Algunos de los nutrientes esenciales necesarios para el desarrollo de la actividad nodular como son

el Fósforo, Hierro, Calcio, Molibdeno, Cobalto y Zinc, son escasos. En lugares con elevadas precipitaciones los procesos de lixiviado producen su escasez, por lo tanto, la disponibilidad de elementos nutritivos y la actividad de los microorganismos fijadores son esenciales para la fijación biológica del nitrógeno.

III.5 Modelos Estadísticos Aplicados a la Agricultura

Un modelo es la representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones. Pueden ser descriptivos o de simulación, en los primeros únicamente se representan los componentes del sistema, mientras que en los segundos se imita el funcionamiento del sistema y se obtienen resultados predictivos, en forma de datos numéricos o gráficos.

Por las ventajas del modelaje en la exploración de sistemas, y por la importancia de la agricultura en el desarrollo de la humanidad y el uso de los recursos naturales, se ha implementado el uso de modelos para su representación, estudio y planeación, en aras de obtener una producción optimizada, eficiente y sustentable.

III.5.1 Tipos de modelos

Con base a las capacidades de representar la dinámica y control de los componentes e interacciones del sistema (Quinteros et al., 2006), los modelos son:

- 1) Estáticos, cuando se representa un sistema en un solo instante de tiempo en particular, o bien para representar un sistema en donde el tiempo no es importante, por ejemplo, simulación Montecarlo;
- 2) Dinámicos, representan sistemas en los que las variables son funciones del tiempo, permitiendo predecir su desarrollo en un periodo dado; este tipo de modelos es de gran importancia para representar procesos biológicos;
- 3) Determinísticos, no consideran la variación estocástica, comportándose de manera probabilística, los datos de entrada y las relaciones existentes en el sistema son especificados al inicio, es decir, no influye el azar en los resultados;
- 4) Estocásticos, la modelación se realiza considerando que al menos una de las variables que definen el comportamiento del sistema se muestra aleatoria, y entonces el resultado es al menos en parte variable.

Sin embargo, los modelos lineales o estáticos, no describen la dinámica de los procesos biológicos y físicos que ocurren en el sistema, y en los resultados no se incluye sus efectos e interacciones. Mientras que los modelos dinámicos, representan los procesos que se desarrollan en un sistema a través del tiempo y los integra en la representación de su comportamiento. También proporcionan una herramienta para evaluar los sistemas de producción más completa y adaptable a diferentes condiciones, por integrar todos los procesos como variables (Rotz et al., 2005a)

III.5.2 Importancia del uso de modelos en la agricultura:

Según Gormley y Sinclair (2003), en el desarrollo de la ciencia se han diseñado y aplicado modelos durante siglos en diferentes disciplinas; sin embargo, los relacionados con los procesos agrícolas y ambientales se han implementado en las últimas décadas. Esto obedece a que en diferentes situaciones es más fácil trabajar con los modelos que con los sistemas reales, ya sea porque el sistema es demasiado grande y complejo, por limitación de recursos humanos y económicos, o por la imposibilidad de experimentar en dichos sistemas.

Es por esto que en la investigación y planificación agrícola el desarrollo de modelos para simular diferentes procesos relacionados con su eficiencia se ha convertido en una práctica común que, sustentada con la información científica disponible, es útil para pronosticar resultados en situaciones y condiciones específicas; lo que permite plantear nuevas hipótesis y orientar la investigación o el manejo hacia los puntos más críticos.

III.5.3 Técnicas de Análisis Estadístico Multivariado

La estadística es una ciencia aplicada que usa herramientas y técnicas matemáticas que permiten evaluar las características de una población con base en inferencias inductivas y con algún grado de incertidumbre. Las principales actividades que aborda esta ciencia, están relacionadas con la recolección de datos producto de la medición o valoración de variables que tiene por objeto describir su comportamiento, establecer conclusiones e inferencias sobre su comportamiento futuro.

Cuando este concepto se aplica en las diferentes disciplinas biológicas, como en las ciencias agrícolas y pecuarias, se denomina bioestadística (Steel y Torrie, 1988; Estuardo, 2012).

La bioestadística utiliza técnicas de manejo de datos que conllevan a la formulación de conclusiones sobre un determinado campo investigativo, basadas en el análisis de probabilidades que permite inferir con alto grado de confianza, el cumplimiento o no de las hipótesis propuestas (inferencia estadística) u obtener conclusiones con base en una muestra aleatoria de una población referencia (Gómez, 2005; Llinás, 2010; Gorgas et al., 2011).

III.5.4 Análisis de variancia:

El ANOVA es un conjunto de técnicas estadísticas de gran utilidad y ductilidad. Es útil cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados, cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones, cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afectan el resultado y se necesita ajustar su efecto o cuando se desea analizar simultáneamente el efecto de dos o más tratamientos diferentes.

La forma más simple es el llamado ANOVA de una vía o factor, cuando existe una sola variable independiente para clasificar a los sujetos y dos o más niveles (que definen los grupos) de ella. Las otras formas de ANOVA (de 2 o más factores o de medidas repetidas) son extensiones basadas en el mismo raciocinio.

III.5.5 Análisis de Covarianza:

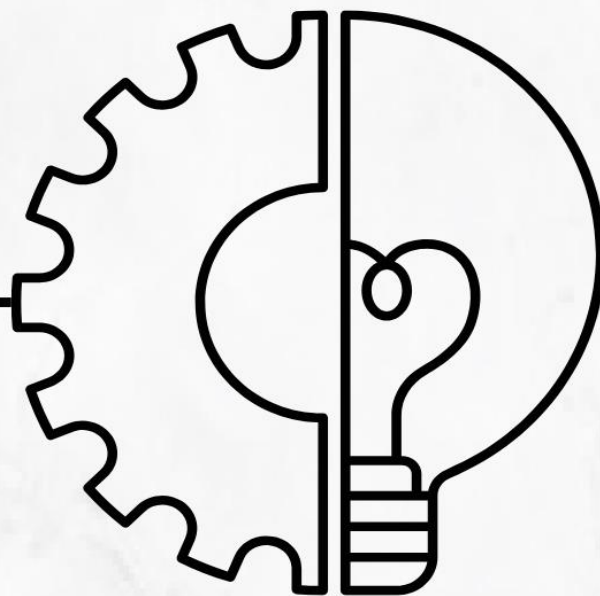
Se define el análisis de covarianza (ANACO), como una prueba estadística que analiza la relación entre una variable dependiente y las independientes, eliminando y controlando el efecto de por lo menos una de estas variables independientes, procedimiento estadístico que permite eliminar la heterogeneidad causada en la variable de interés (variable dependiente) por la influencia de una o más variables cuantitativas (covariables).

III.5.6 Análisis de correlación:

Esta técnica estadística sirve para entender si existe una relación entre dos o más variables, ayudando a determinar si una variable se mueve en función de la otra. Si hay

algún tipo de correlación, ambas variables se alterarán juntas durante un periodo de tiempo.

- a. Análisis de correlación positiva: Se presenta cuando el aumento de cualquiera de las dos variables, hace que la otra también crezca. Esto implica que existe una correlación positiva entre ellas.
- b. Análisis de correlación negativa: Aparece cuando el aumento de cualquiera de las variables causa que la otra disminuya. Esto supone que hay una correlación negativa entre ellas.



CAPÍTULO 4:

DESARROLLO

IV.1 Diagrama General. Metodología.

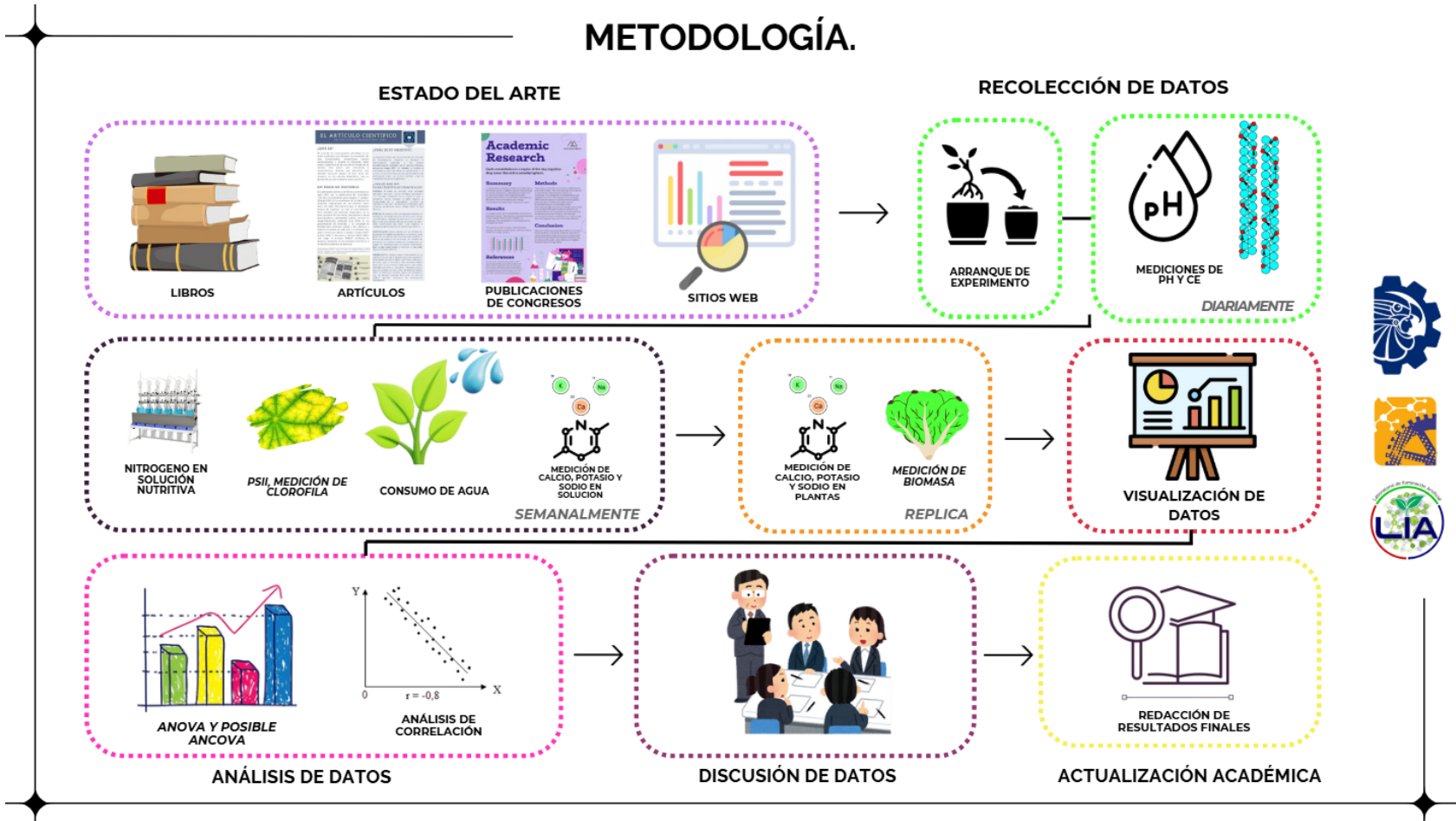


Figura 6. Metodología General.

IV.2 Estado del Arte.

El objetivo principal de la presente actividad es identificar, analizar y sintetizar el conocimiento existente en relación con el tema de estudio. Esta actividad busca recopilar información relevante sobre conceptos clave, teorías, herramientas y enfoques metodológicos, así como identificar las posibles lagunas de conocimiento que justifican el desarrollo del proyecto. Para ello, se consultarán fuentes confiables como libros, artículos científicos, sitios web especializados, y publicaciones de congresos académicos.

La actividad no solo permitirá construir una base teórica sólida, sino que también fomenta el desarrollo de habilidades y herramientas críticas como el análisis comparativo, la interpretación de resultados previos y la capacidad para identificar tendencias y desafíos en el campo de estudio. Esto resulta esencial para fundamentar la elaboración, justificación y discusión de los resultados del proyecto. Así pues, se realizará bajo las siguientes premisas:

1. Búsqueda y Revisión de Fuentes de Información.
 - a. Se localizará y seleccionarán libros, artículos científicos, sitios web confiables y publicaciones de congresos relacionados con los términos clave del proyecto, como "*fijación de nitrógeno*", "*Análisis Estadístico en VF*", "*agricultura vertical*", y "*biomecatrónica*".
 - b. Priorizaré el uso de bases de datos científicas como Scopus, Springer, IEEE Xplore, y Google Scholar.
2. Análisis de Literatura Relevante
 - a. Leeré y analizaré críticamente los documentos seleccionados, identificando teorías, métodos y resultados aplicables al proyecto.
 - b. Se evaluarán la calidad, relevancia y las posibles vigencias de cada fuente, destacando aquellas que presentan avances recientes y enfoques innovadores.
3. Identificación de Herramientas y Métodos.

- a. Se examinarán las herramientas estadísticas, estocásticas y biomecátricas utilizadas en investigaciones previas para determinar su aplicabilidad al proyecto.
 - b. Se compararán diferentes enfoques metodológicos para seleccionar aquellos que optimicen los objetivos del estudio.
4. Elaboración de un Marco Conceptual y Teórico
- a. Se sintetizará la información recopilada para construir un marco conceptual que defina los términos clave y relacione las variables del proyecto.
 - b. Se redactará un marco teórico que presente las teorías y enfoques más relevantes, destacando su relación con los objetivos del proyecto.

IV.3 Recolección de Datos.

El experimento tendrá tres replicas, y constará de seis tratamientos y trece variables que se obtendrán en la presente actividad misma que está delimitada por tres tipos de recolección de datos (variables), (diarios, semanales y por replica), se asegurará la calidad y la consistencia de los datos mediante protocolos claros de registro y almacenamiento. La actividad incluye tareas como la calibración de equipos, la ejecución de experimentos controlados, y el registro metódico de las mediciones bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo.

IV.3.1 Mediciones Diarias.

IV.3.1.1 pH y CE.

Se hará uso de un Medidor de mesa AQUASEARCHER™ AB33M1 con el fin de monitorear el pH, analizar fluctuaciones, alteraciones y cualquier comportamiento que se pudiera tener en los tratamientos del experimento. El registro se hará de manera diaria, al final del DLI y la calibración de este será semanalmente.



Figura 7 Medidor de mesa AQUASEARCHER™ AB33M1

IV.3.2 Mediciones Semanales.

IV.3.2.1 NO³⁻ en Solución Nutritiva.

La medición de los nitratos se llevará a cabo de manera semanal y será realizada en todos los tratamientos del experimento, así mismo se usará un MEDIDOR DE

NITRATOS LAQUATWIN NO311 de la marca HORIBA. La calibración del equipo se hará de manera diaria bajo la recomendación del fabricante.



Figura 8 MEDIDOR DE NITRATOS LAQUATWIN NO311

IV.3.2.3 Clorofila.

Se hizo uso de un cuantificador de clorofila en medidas SPAD “SPAD-502 Plus 2900P-C”. La cuantificación indirecta de la clorofila representa una herramienta fiable y con potencial para guiar el manejo de fertilizante nitrogenado para el cultivo (Vasconcelos, 2021). Las mediciones se hicieron semanales una hora antes de concluir su DLI (Breeuwer et al., 2008) en el tercio medio de la hoja (Reis et al., 2006). La calibración de este se hace después de cada medición.



Figura 9 SPAD-502 Plus 2900P-C

IV.3.2.4 Consumo de Agua.

El consumo de agua se monitoreará de manera semanal, se contarán con tinas tipo palanganas de 50L que contendrán 47.5L de agua al inicio del experimento, se simulará en Python la tina conociendo la altura completa de la tina, el diámetro interior y exterior, y así, en relación con la altura que tiene el líquido se hará una relación para conocer el contenido de esta en las semanas.



Figura 10 Tina Tipo Palangana.

IV.3.2.5 Calcio

La medición del calcio en los tratamientos se llevará a cabo de manera semanal, se usará un MEDIDOR DE CALCIO LAQUATWIN Ca11 de la marca HORIBA. La calibración del equipo se hará de manera diaria bajo la recomendación del fabricante.



Figura 11 MEDIDOR DE CALCIO LAQUATWIN Ca11

IV.3.2.6 Sodio.

La medición del calcio en los tratamientos se llevará a cabo de manera semanal, se usará un MEDIDOR DE SODIO LAQUATWIN Na11 de la marca HORIBA. La calibración del equipo se hará de manera diaria bajo la recomendación del fabricante.



Figura 12 MEDIDOR DE SODIO LAQUATWIN Na11

IV.3.3 Mediciones por Réplica.

Las mediciones “por réplica” se hacen de manera mensual y sólo se hacen una vez, al inicio del experimento y al final de este debido a que son mediciones “destructivas”, mismo término que se refiere a que son pruebas que dañan o destruyen la parte que se somete a prueba (Minitab, 2024), en este caso, las plantas.

IV.3.3.1 Calcio en Plantas.

Al igual que en las mediciones semanales de las soluciones nutritivas, en la medición del calcio en las plantas se usará un MEDIDOR DE CALCIO LAQUATWIN Ca11 de la marca HORIBA, se llevará a cabo de manera mensual (por replica) una al inicio y al final del experimento. La calibración del equipo se hará de manera diaria bajo la recomendación del fabricante (véase figura x en la sección IV.3.2.5)

IV.3.3.2 Sodio en Plantas.

Al igual que en las mediciones semanales de las soluciones nutritivas, en la medición del calcio en las plantas se usará un MEDIDOR DE SODIO LAQUATWIN Na11

de la marca HORIBA, se llevará a cabo de manera mensual (por replica) una al inicio y al final del experimento. La calibración del equipo se hará de manera diaria bajo la recomendación del fabricante (véase figura x en la sección IV.3.2.6)

IV.3.3.3 NO³⁻ en Plantas.

Así como los dos anteriores, los nitratos en plantas se medirán al inicio del experimento y al final de este, se hará uso del mismo sensor que en IV.3.2.1, este sensor también tiene la cualidad de medir los nitratos presentes en la savia de la planta, así pues, se considera una medición “destrucciona”.

IV.3.3.4 Peso en Fresco

El peso fresco de las muestras será determinado por réplica al inicio y al final del experimento, utilizando una balanza analítica de la marca “OHAUS Adventurer® Balanza” de 420 gramos con una precisión de 0.001 gramos. Además, se tomarán muestras de plántulas hermanas al inicio para comparar el peso fresco inicial y final. Este enfoque permite evaluar el crecimiento y desarrollo de las plantas bajo las condiciones experimentales específicas, asegurando mediciones precisas y comparativas.



Figura 13 OHAUS Adventurer® Balanza

IV.3.3.4 Peso en Seco

Por su parte, El peso seco de las muestras será determinado por réplica al inicio y al final del experimento. Las muestras se secarán en un horno de convección forzada por gravedad de la marca BINDER con una capacidad de 57L a 70°C durante 72 horas continuas y luego serán pesadas utilizando una balanza analítica “OHAUS Adventurer® Balanza” de 420 gramos con una precisión de 0.001 gramos. Al igual que con el peso fresco, se utilizarán muestras de plántulas hermanas al inicio para comparar el peso seco inicial y final. Este método asegura la evaluación precisa del rendimiento de biomasa de las plantas, reflejando su crecimiento y producción de materia seca bajo las condiciones experimentales establecidas.



Figura 14 Horno de Convección Forzada BINDER.57L.

IV.3.3.4 Área Foliar.

El área foliar se obtendrá con el ayuda del Software ImageJ, mismo programa que en relación con una distancia conocida en pixeles y cm, hace una relación directa entre el área por hoja de las plantas.

IV.4 Análisis de Datos.

IV.4.1 Limpieza y Organización de Datos

- i. Se revisarán los datos recolectados para identificar y corregir errores, valores atípicos o datos faltantes.
- ii. Se estandarizarán las variables en un formato consistente para facilitar su análisis.
- iii. Se utilizarán softwares especializados como Python, Minitab o Excel para organizar los datos en tablas y hojas de cálculo.

IV.4.2 Selección y Aplicación de Métodos Estadísticos

- i. Una vez obtenidos y organizados los datos, se usarán las técnicas de análisis más adecuadas (ANOVA para comparar tratamientos, regresión para identificar relaciones entre variables).
- ii. Se implementarán los métodos seleccionados utilizando herramientas estadísticas como Python, Minitab o Excel

IV.4.3 Análisis de Relaciones y Tendencias

- i. Se realizará un análisis de correlación para evaluar la relación entre las variables independientes (ej., CE, pH, temperatura) y la fijación de nitrógeno.
- ii. Se identificarán patrones y tendencias significativas en los datos que puedan responder a las hipótesis planteadas.

IV.4.4 Simulaciones y Modelado Estocástico

- i. Se implementarán posibles simulaciones de Monte Carlo o modelos probabilísticos para explorar la incertidumbre y la aleatoriedad de los datos experimentales.
- ii. De ser simulado, se compararán los resultados de los modelos estocásticos con los datos observados para validar las predicciones bajo diferentes escenarios.

IV.4.5 Visualización de Resultados

- i. Así pues, se crearán gráficos, tablas y diagramas que representen claramente los resultados obtenidos (boxplots para ANOVA, gráficos de dispersión para correlaciones).
- ii. Se optará por asegurarse de que las visualizaciones sean claras y permitan interpretar fácilmente los hallazgos.
- iii. Se incluirán indicadores como barras de error, intervalos de confianza y p-valores para respaldar la interpretación de los resultados.

IV.5 Discusión de Datos.

La discusión de datos será la etapa en la que los resultados obtenidos de los análisis realizados en “IV.3. Recolección de Datos” son comparados y contextualizados con el marco teórico, los objetivos del proyecto, y estudios previos. Aquí se identificarán las implicaciones de los hallazgos, las posibles limitaciones del estudio y las oportunidades para futuras investigaciones.

En esta actividad, se evaluará si los resultados respaldan o contradicen las hipótesis iniciales y se interpretan las razones detrás de las tendencias observadas. Además, se argumentará cómo las contribuciones del proyecto aportan al avance del conocimiento en el campo de la fijación de nitrógeno y la agricultura vertical, destacando su relevancia científica y práctica.

Lo anterior se hará con reuniones semanales que se tendrán con todo el equipo de trabajo a manera de retroalimentación y para atribuir los resultados a los fenómenos estudiados, así pues, después de hacer la discusión, se procederá a plasmar la información y reportarla al encargado del proyecto con el fin de que éste haga la publicación necesaria en la literatura.

IV.6 Redacción de Resultados.

La redacción de resultados será la actividad en la que se presentarán los hallazgos obtenidos del análisis de datos de manera clara, estructurada y objetiva. En esta etapa, se expondrán los datos más relevantes y se explicarán las tendencias, relaciones y patrones identificados, evitando interpretaciones o discusiones que pertenezcan a secciones posteriores.

IV.6.1 Selección y Organización de Resultados Relevantes

- i. Se identificarán los datos más significativos obtenidos en el análisis, como valores promedio, relaciones significativas y tendencias destacadas.
- ii. Se clasificarán los resultados según los objetivos específicos o las variables analizadas, estructurándolos en subsecciones lógicas.

IV.6.2 Elaboración de Tablas y Gráficos

- i. Se crearán gráficas visuales claras y concisas que apoyen la comprensión de los hallazgos.

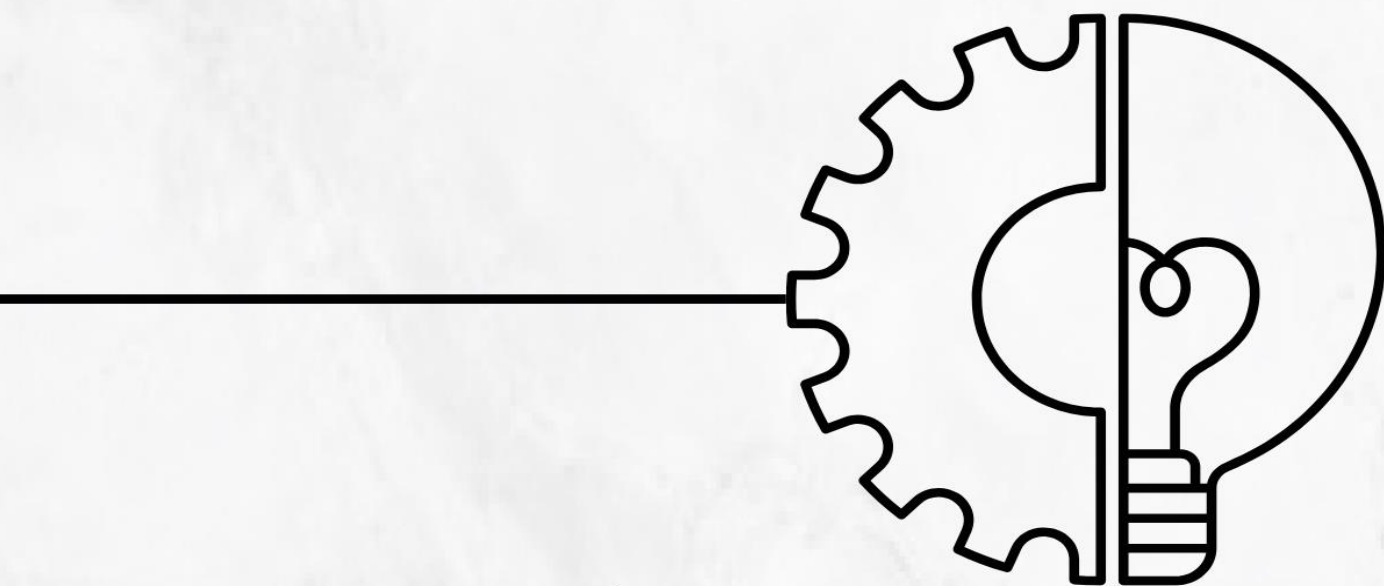
IV.6.3 Redacción de un Texto Descriptivo

- i. Se explicará de manera objetiva lo que muestran los resultados, evitando opiniones o interpretaciones personales.
- ii. Se relacionarán los resultados con las preguntas de investigación y se destacarán aquellos que cumplen o no con las hipótesis planteadas.
- iii. Se hará uso de un lenguaje técnico, preciso y conciso, asegurándose de que los términos y unidades estén correctamente empleados.

IV.7 Cronograma de Actividades.

Tabla 2 Cronograma de Actividades.

REPLICAS		REPLICA 1					REPLICA 2					REPLICA 3				
No.	ACTIVIDAD	02/09/2024	09/09/2024	16/09/2024	23/09/2024	30/09/2024	07/10/2024	14/10/2024	21/10/2024	28/10/2024	04/11/2024	11/11/2024	18/11/2024	25/11/2024	02/12/2024	09/12/2024
1	ESTADO DEL ARTE															
2	RECOLECCIÓN DE DATOS DIARIOS															
3	RECOLECCIÓN DE DATOS SEMANALES															
4	RECOLECCIÓN DE DATOS POR REPLICA															
5	ANÁLISIS DE DATOS															
6	PRESENTACIONES DE AVANCES															
7	REVISIONES MENSUALES															
8	REUNIONES DE DISCUSIÓN															
9	REDACCIÓN DE TESIS															
10	CURSO INTENSIVO PYTHON															



CAPÍTULO 5:

RESULTADOS

V.1 Estado del Arte.

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las investigaciones y aplicaciones previas relacionadas con la Fijación de Nitrógeno: Procesos y Relevancia en Agricultura, Modelos Estadísticos Aplicados al Estudio de la Fijación de Nitrógeno y Diseño Experimental en la Agricultura Vertical.

En esa etapa, se identificaron las fuentes más relevantes, incluyendo artículos científicos, libros y proyectos similares, con el fin de construir una base sólida de conocimiento. El análisis se centró en revisar los objetivos, los métodos y materiales empleados, así como los resultados obtenidos en los estudios relacionados. Posteriormente, la información recopilada fue estructurada y organizada con el fin de facilitar los fundamentos teóricos y técnicos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

V.2 Recolección de Datos.

V.2.1 Mediciones Diarias.

V.2.1.1 pH.

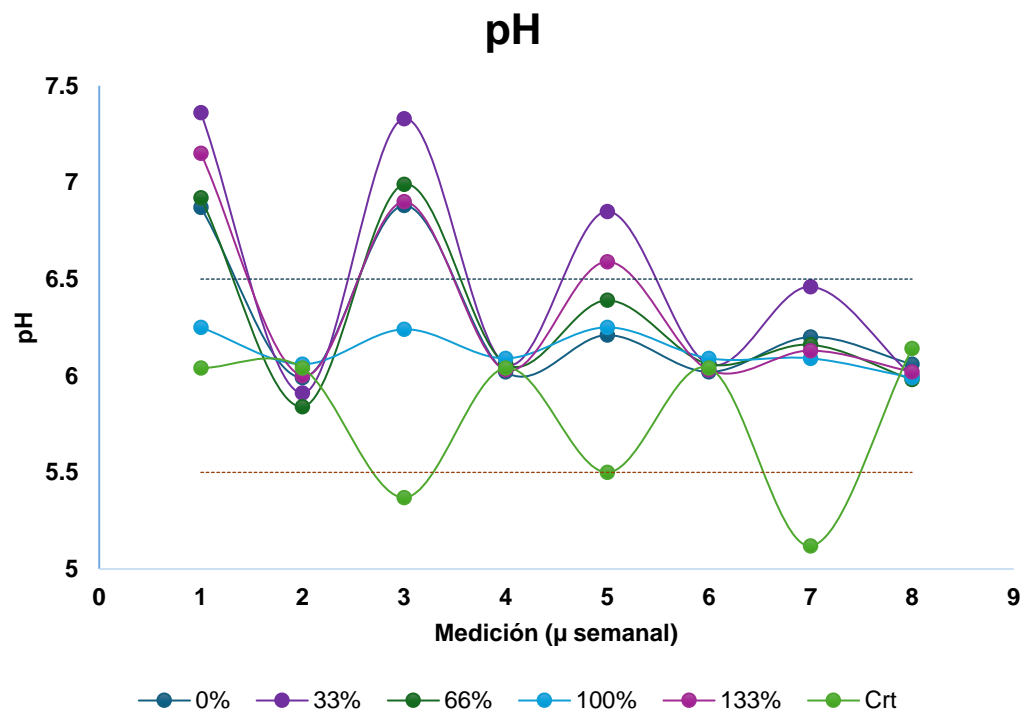


Figura 15 pH

V.2.2 Mediciones Semanales.

V.2.2.1 NO³⁻ en Solución Nutritiva.

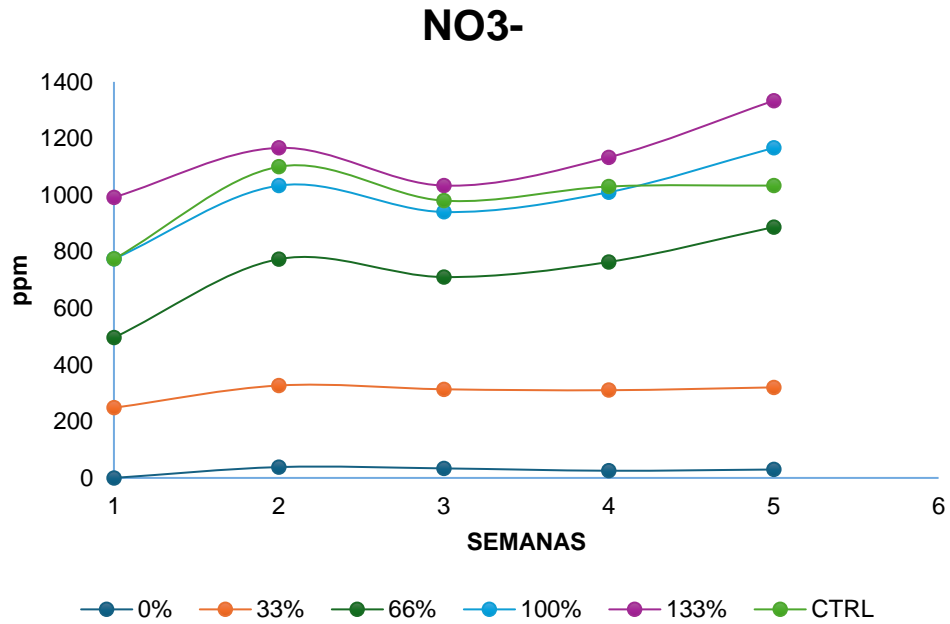


Figura 16 NO₃⁻ en los tratamientos

V.2.2.2 Clorofila.

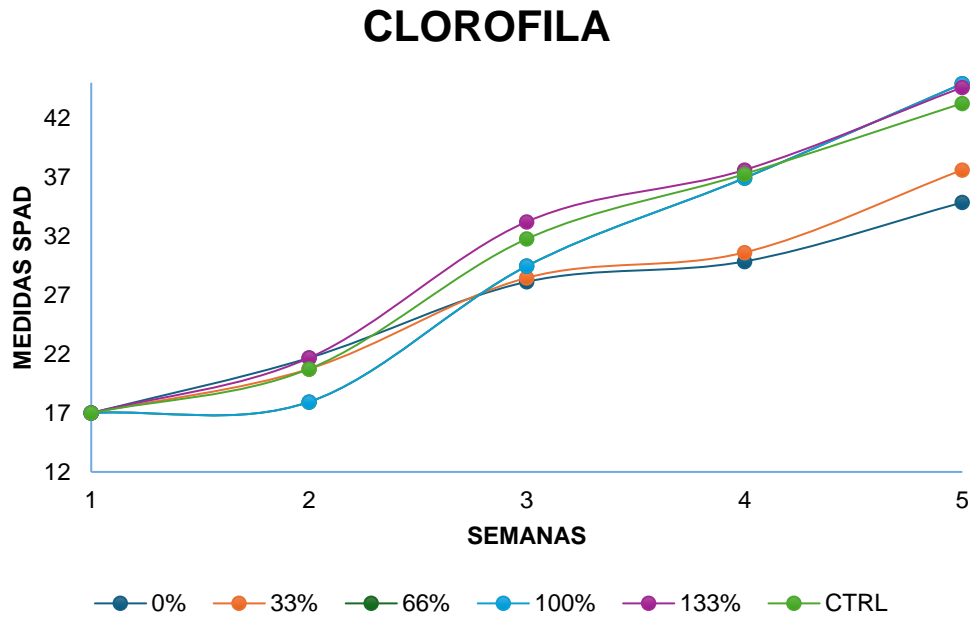


Figura 17 Clorofila en los tratamientos

V.2.2.3 Consumo de Agua.

Para monitorear el consumo de agua se requirió realizar un programa en Python para estimar el consumo de agua en relación con la distancia que tiene la tina tipo palangana que contiene las soluciones nutritivas, el código se muestra en la sección de anexos. La simulación que se hizo en el software se muestra en la figura x como modelo de aproximación.

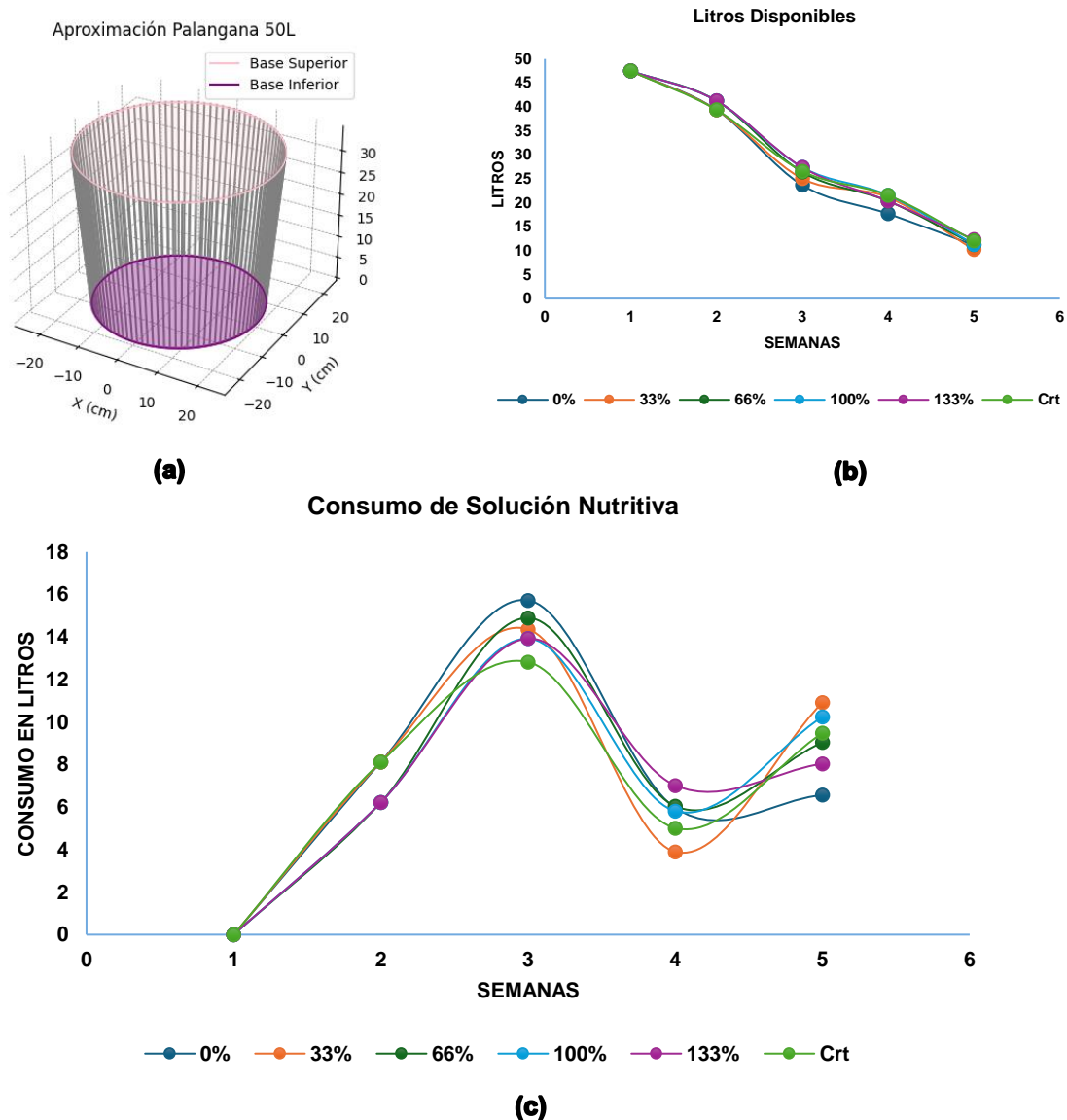


Figura 18 Consumo de agua Consumo de agua donde; (a) Aproximación Palangana 50L; (b) Litros disponibles a través del tiempo; (c) Consumo de agua de plantas por semanas.

V.2.2.4 Calcio

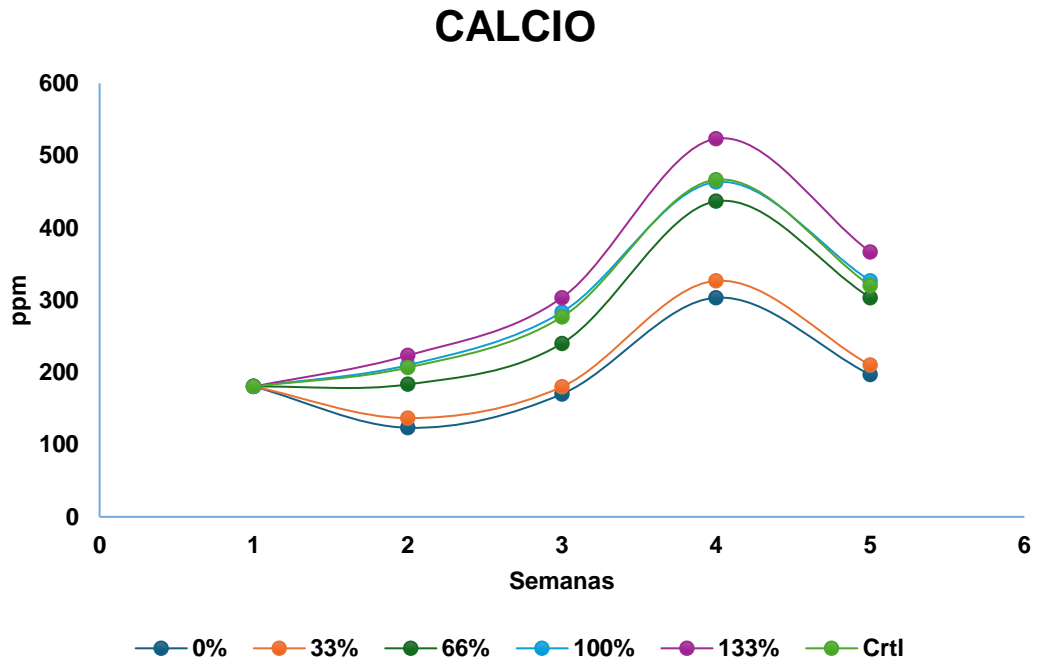


Figura 19 Calcio en los tratamientos

V.2.2.5 Sodio.

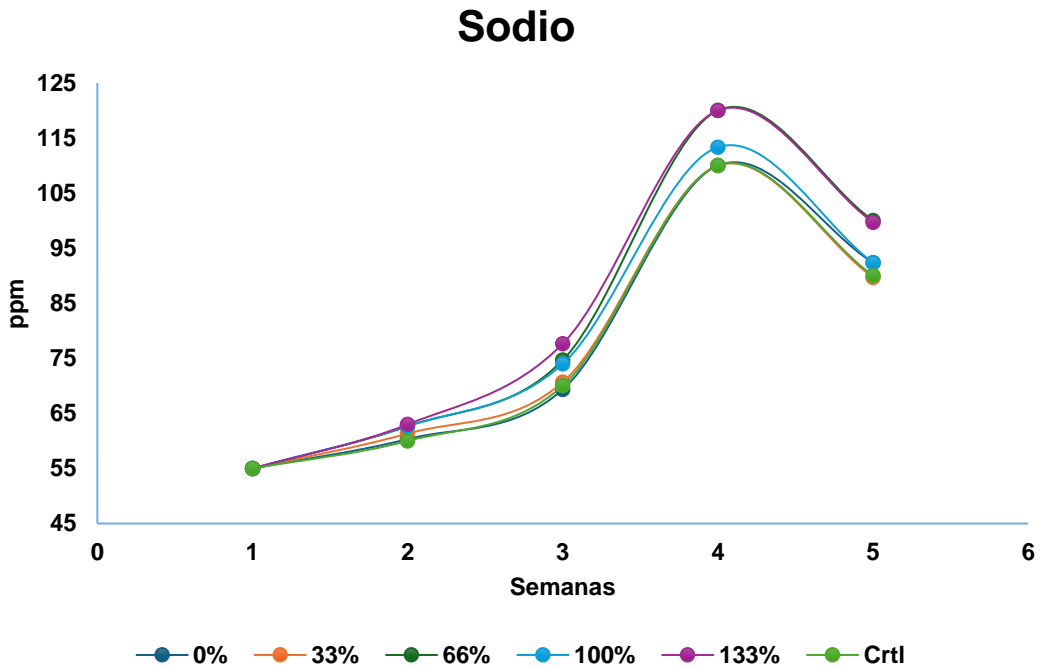


Figura 20 Sodio en los tratamientos

V.2.3 Mediciones por Réplica.

Por términos de confidencialidad y protección de datos del experimento, no se muestran los resultados por réplica. Sin embargo, cabe mencionar que la mejor área foliar de las plantas fue encontrada en 66%, la concentración de NO_3^- mayor se encontró en 100%, así pues, la de calcio estuvo en el control, para el sodio no se presentaron diferencias significativas entre las muestras, solamente 0% tuvo una menor concentración ligeramente. El mayor consumo de agua se presentó en 33% y el menor fue en el control.

V.4 Análisis de Datos.

V.4.1 pH

Agrupación de Datos.

Tabla 3 Agrupación de Datos de pH.

TRATAMIENTOS	N	Media	Agrupación*	
33.00%	5	6.800	A	
133.00%	5	6.554	A	
66.00%	5	6.492	A	
0.00%	5	6.432	A	B
100.00%	5	6.1660	A	B
CTRL	5	5.606		B

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

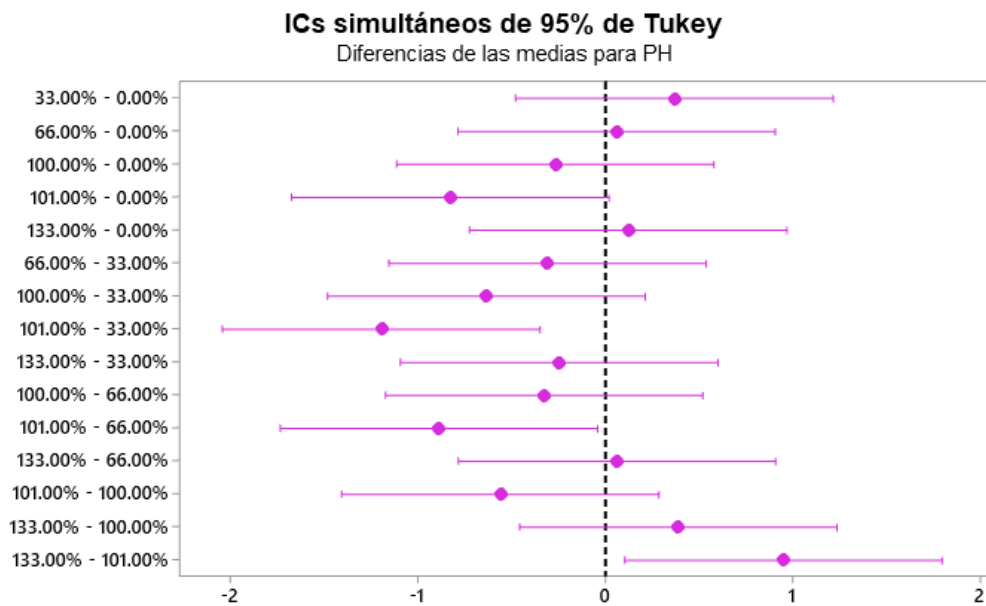


Figura 21 Diferencias para las medias de los tratamientos pH.

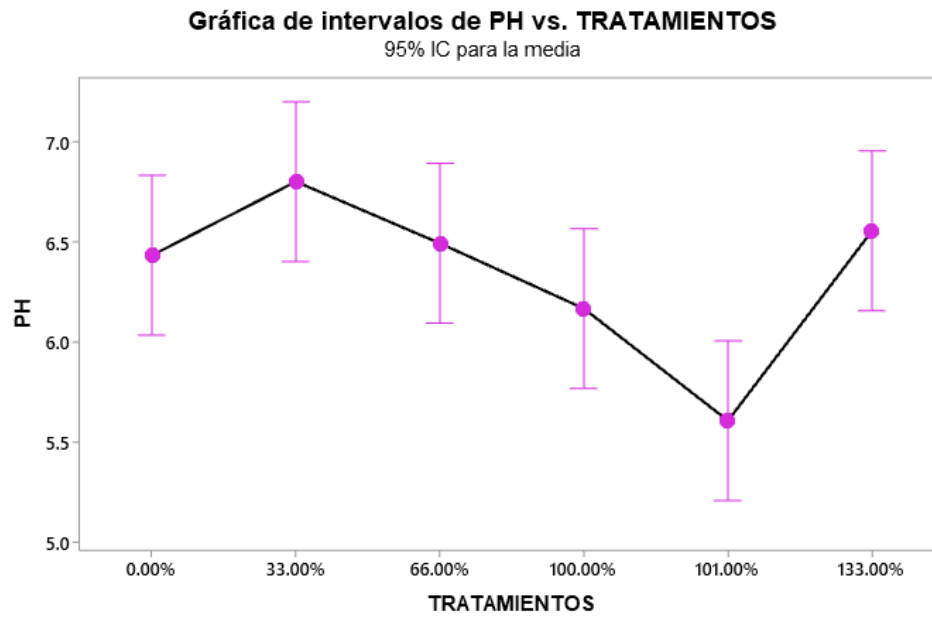


Figura 22 Intervalos para los tratamientos pH.

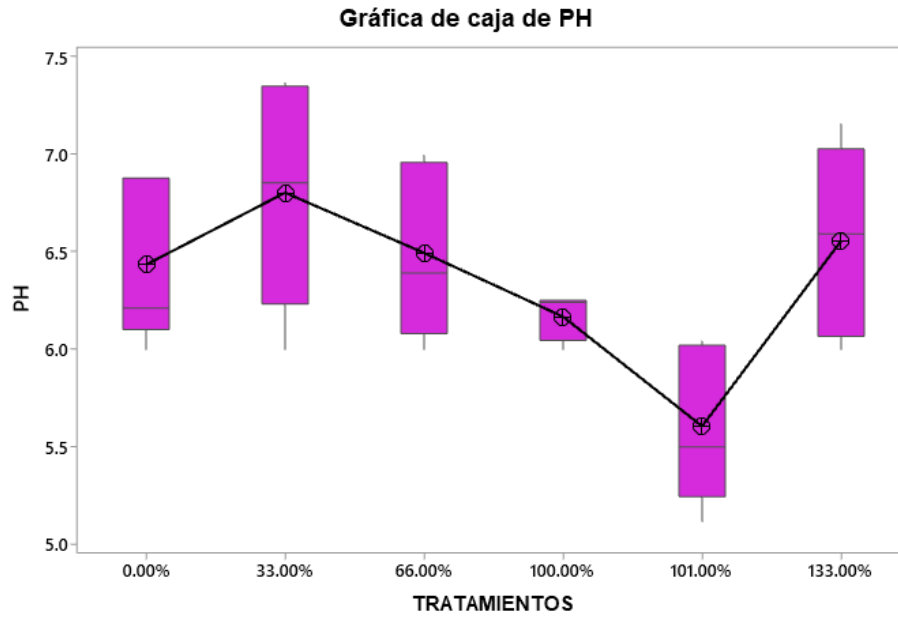


Figura 23 Gráfica de Caja para pH

Gráficas de residuos para PH

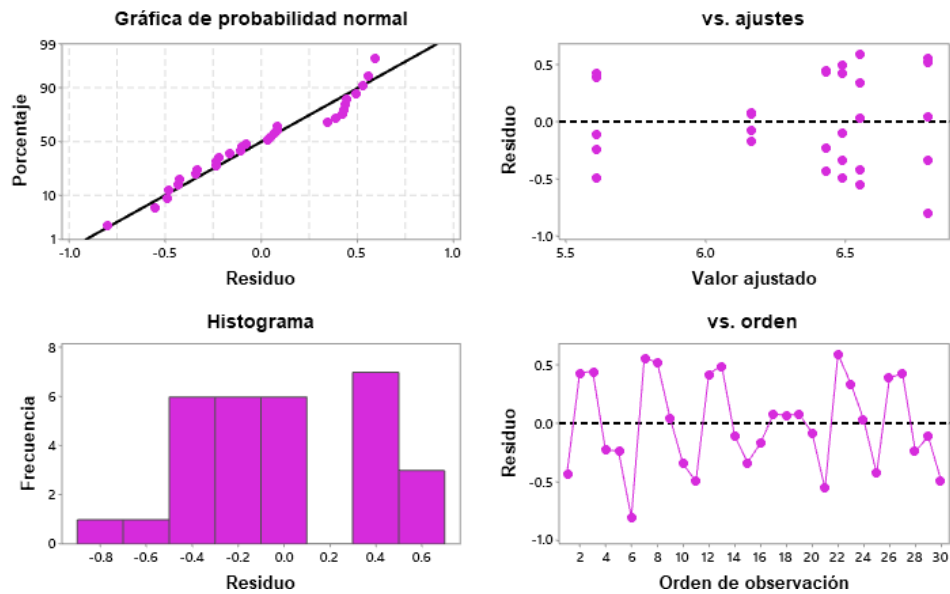


Figura 24 Gráfica de Residuos de pH

V.4.2 NO⁻³ en Solución Nutritiva.

Tabla 4 Agrupación de Datos de NO⁻³

TRATAMIENTOS	N	Media	Agrupación			
133.00%	5	1131.7	A			
100.00%	5	984.8	A			
CTRL	5	983.5	A			
66.00%	5	725.9		B		
33.00%	5	303.6			C	
0.00%	5	25.40				D

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

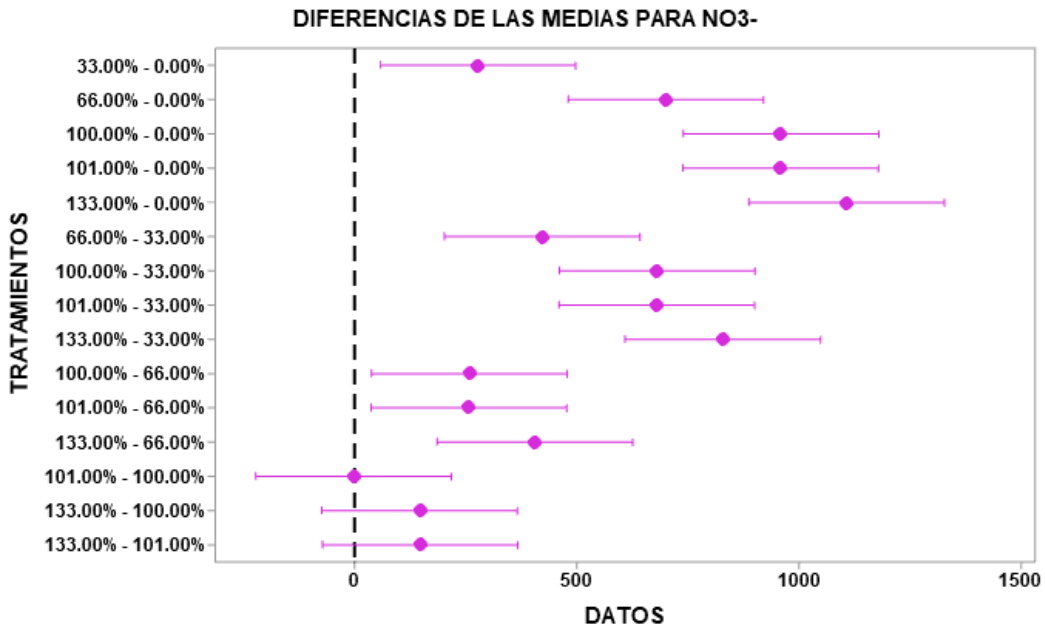


Figura 25 Diferencias para las medias de los tratamientos NO-3.

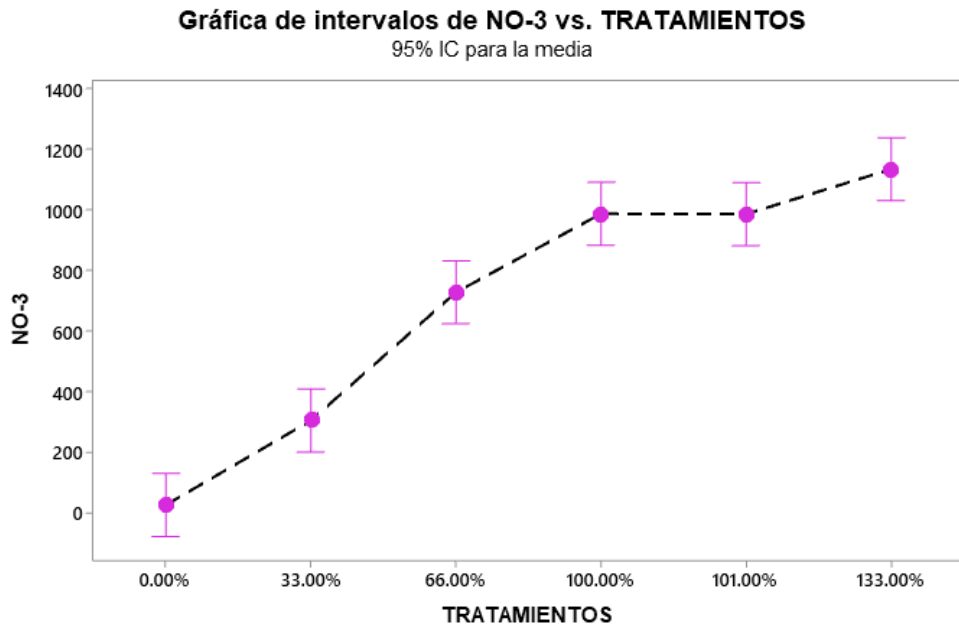


Figura 26 Intervalos para los tratamientos NO-3.

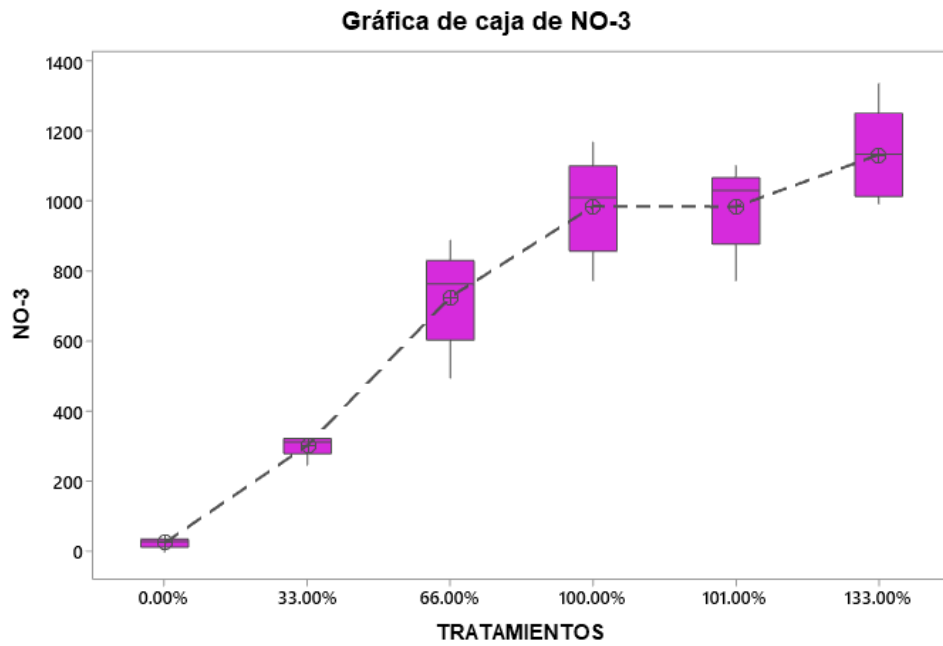


Figura 27 Gráfica de Caja para NO-3.

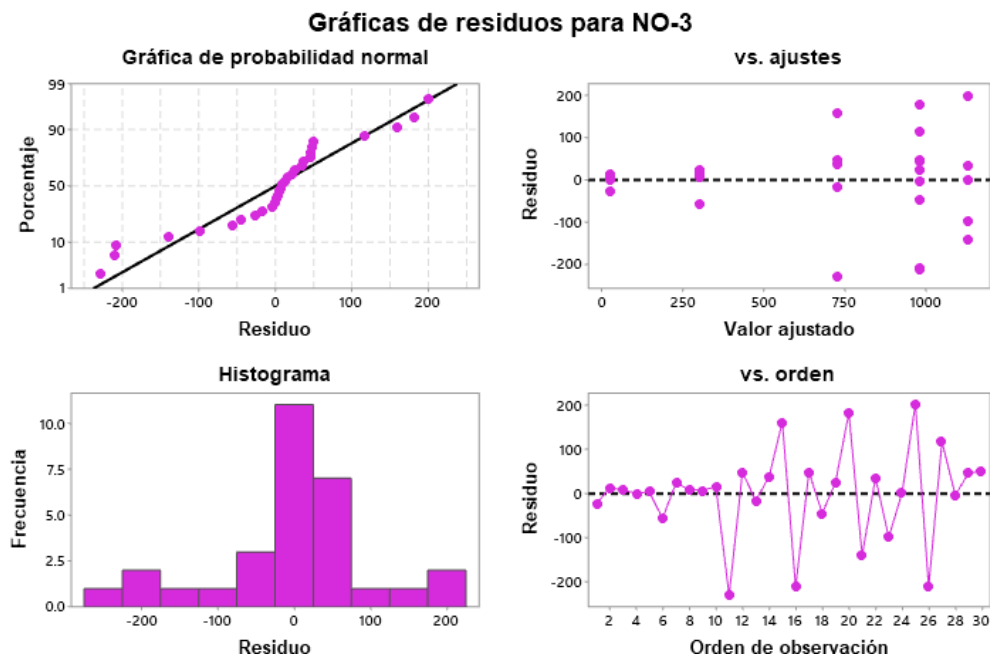


Figura 28 Gráfica de Residuos de NO-3.

V.4.3 Calcio en Solución Nutritiva.

Tabla 5 Agrupación de Datos de Ca.

TRATAMIENTOS	N	Media	Agrupación
133.00%	5	319.4	A
100.00%	5	292.7	A
101.00%	5	290.1	A
66.00%	5	268.7	A
33.00%	5	206.7	A
0.00%	5	194.7	A

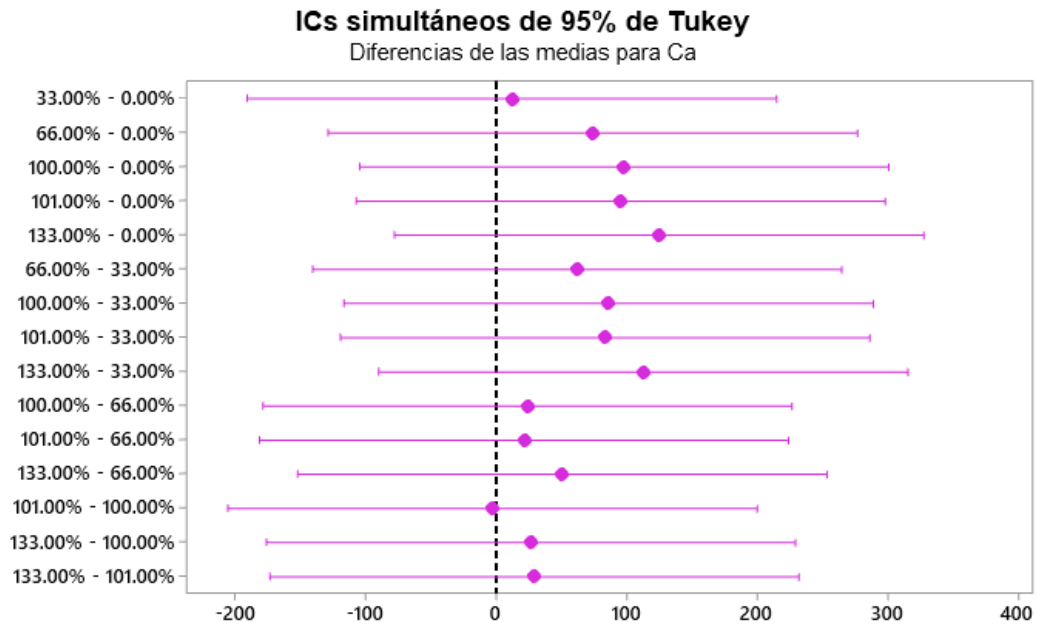


Figura 29 Diferencias para las medias de los tratamientos Ca.

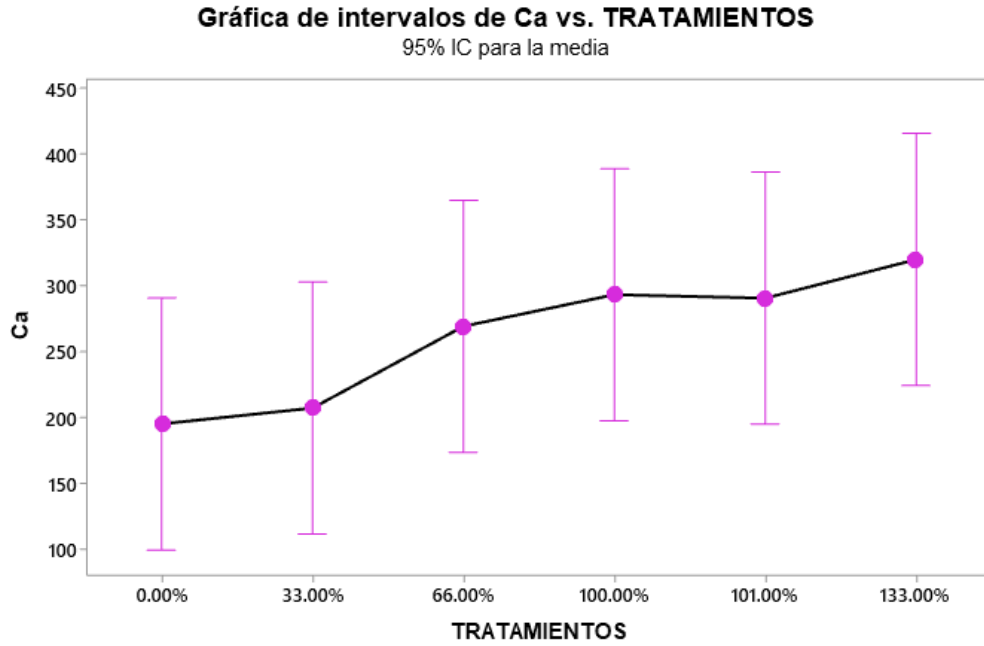


Figura 30 Intervalos para los tratamientos Ca.

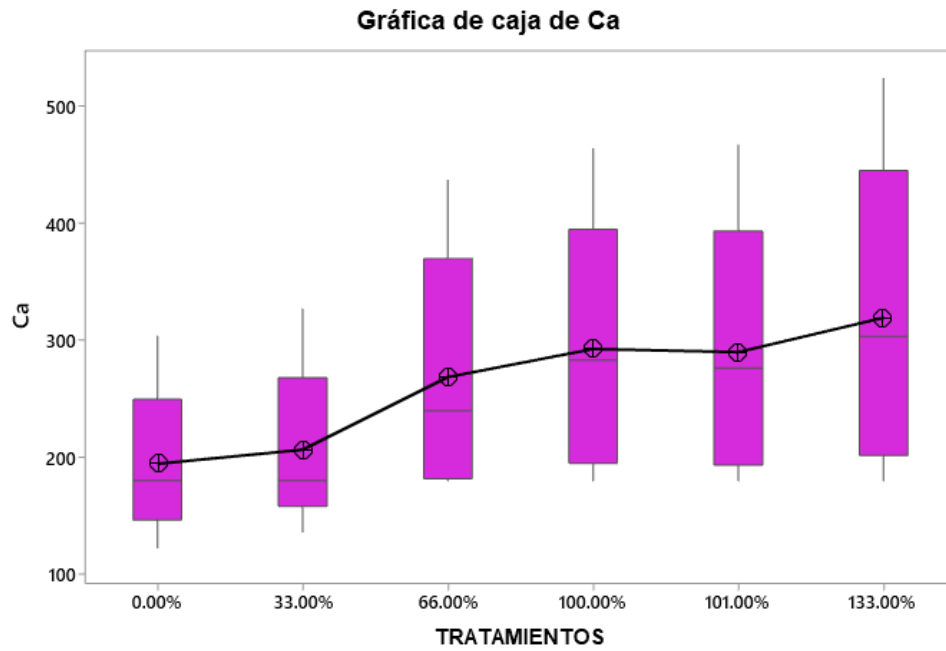


Figura 31 Gráfica de Caja para Ca.

Gráficas de residuos para Ca

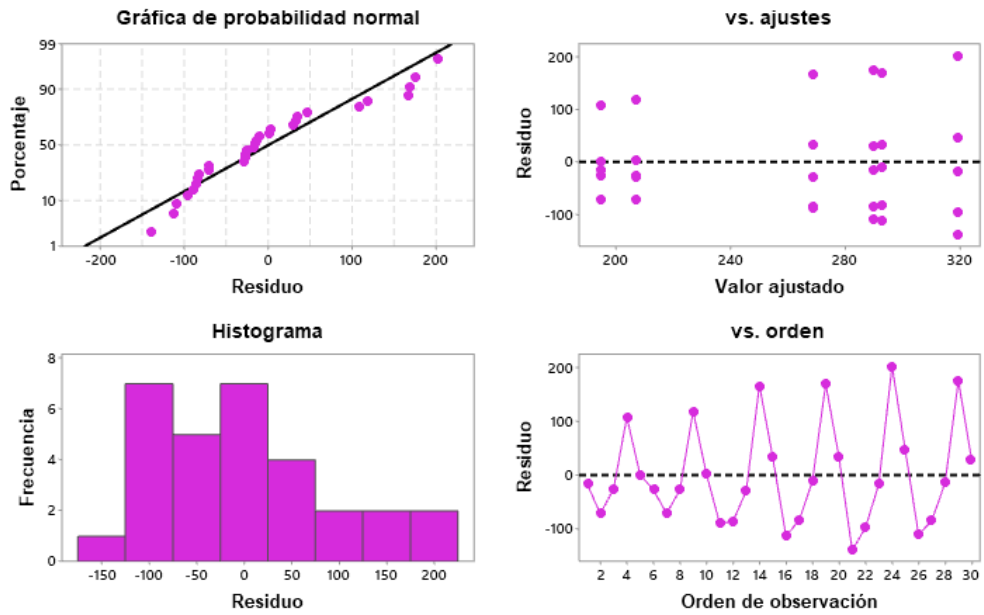


Figura 32 Gráfica de Residuos de Ca.

V.4.4 Sodio en Solución Nutritiva.

Tabla 6 Agrupación de Datos de Na.

TRATAMIENTOS	N	Media	Agrupación
133.00%	5	83.1	A
66.00%	5	82.5	A
100.00%	5	79.5	A
0.00%	5	77.4	A
33.00%	5	77.3	A
CTRL	5	77	A

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Diferencias de las medias para Na

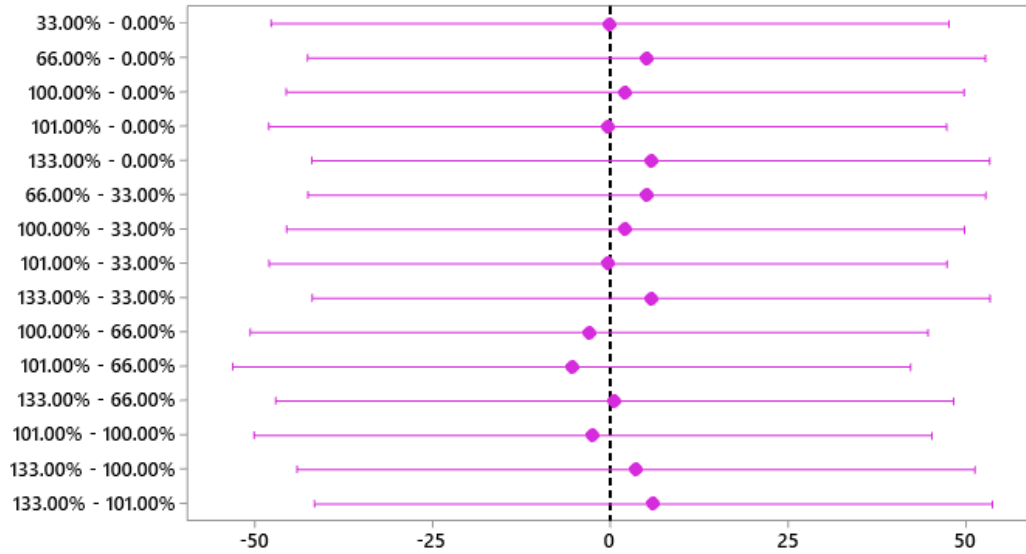


Figura 33 Diferencias para las medias de los tratamientos Na.

Gráfica de intervalos de Na vs. TRATAMIENTOS

95% IC para la media

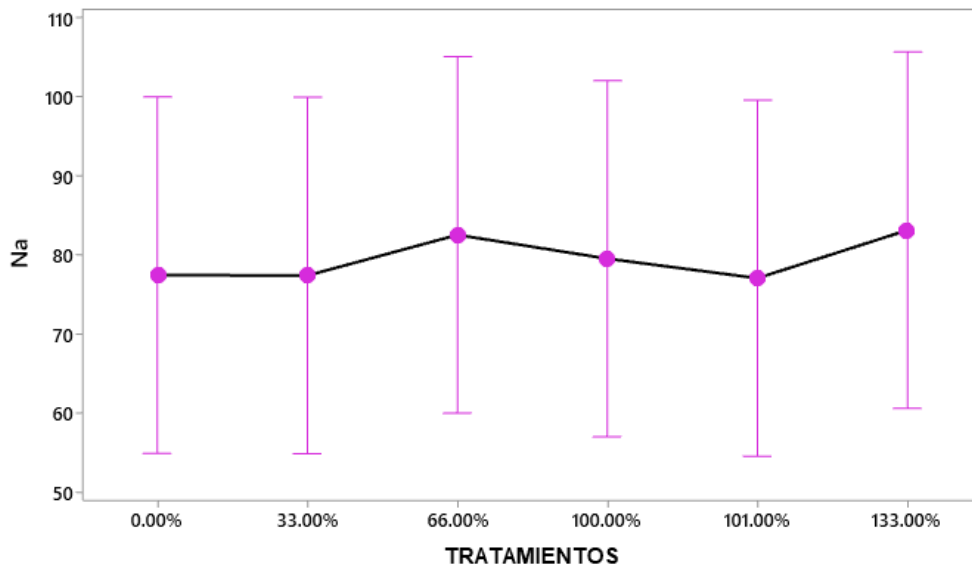


Figura 34 Intervalos para los tratamientos Na.

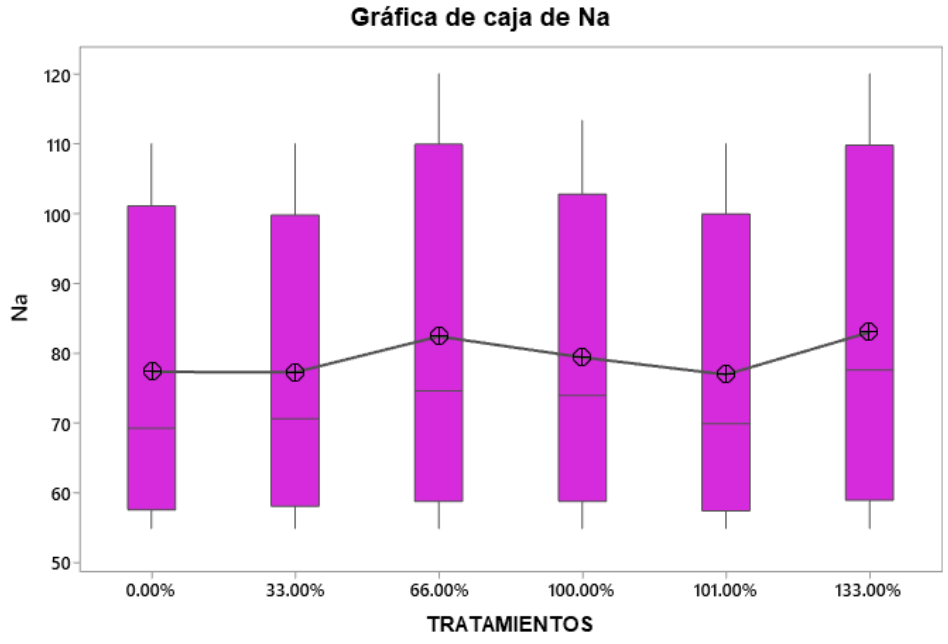


Figura 35 Gráfica de Caja para Na.

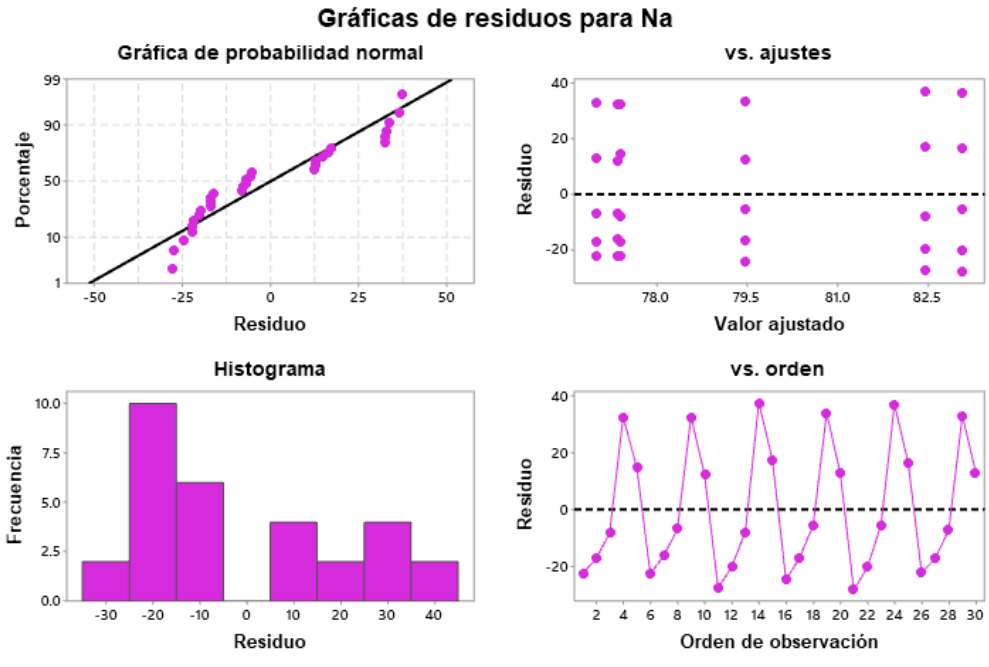


Figura 36 Gráfica de Residuos de Na

V.4.5 Clorofila

Tabla 7 Agrupación de Datos de CHL

TRATAMIENTOS	N	Media	Agrupación
133.00%	5	30.82	A
101.00%	5	30	A
66.00%	5	29.25	A
100.00%	5	28.59	A
33.00%	5	26.88	A
0.00%	5	26.3	A

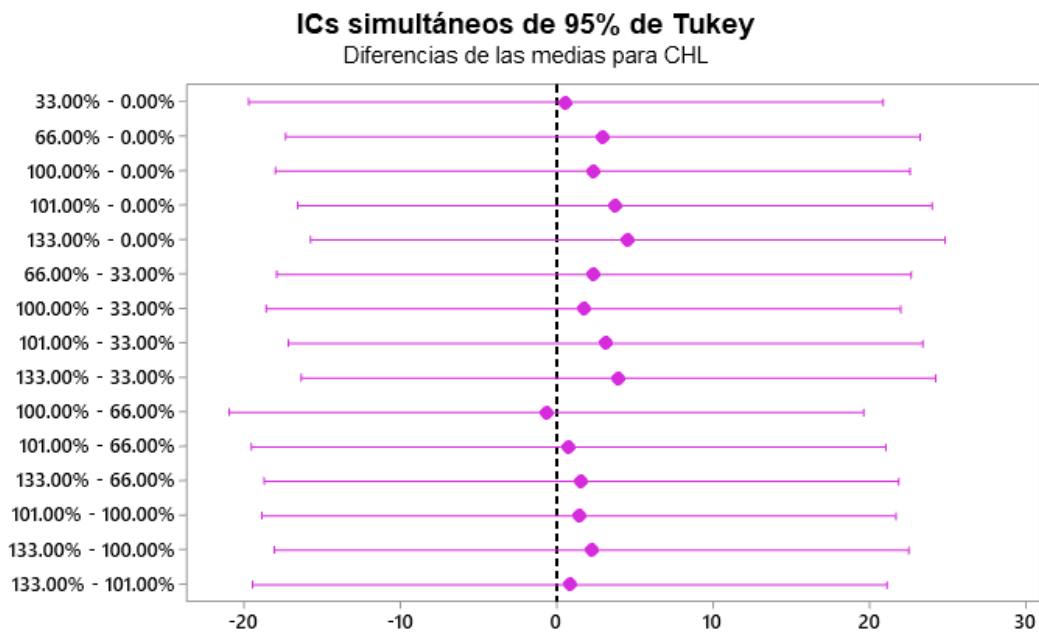


Figura 37 Diferencias para las medias de los tratamientos CHL

Gráfica de intervalos de CHL vs. TRATAMIENTOS

95% IC para la media

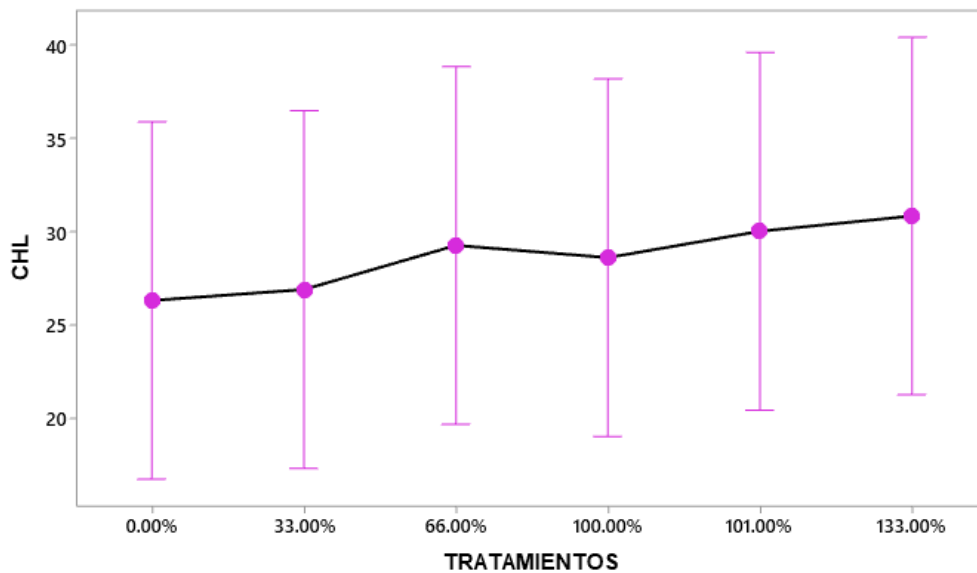


Figura 38 Intervalos para los tratamientos CHL

Gráfica de caja de CHL

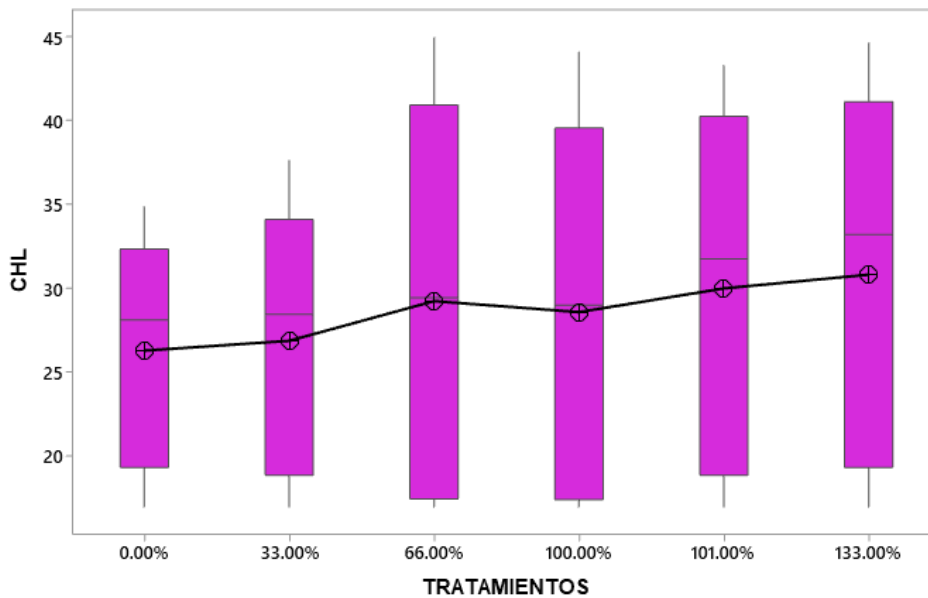


Figura 39 Gráfica de Caja CHL.

Gráficas de residuos para CHL

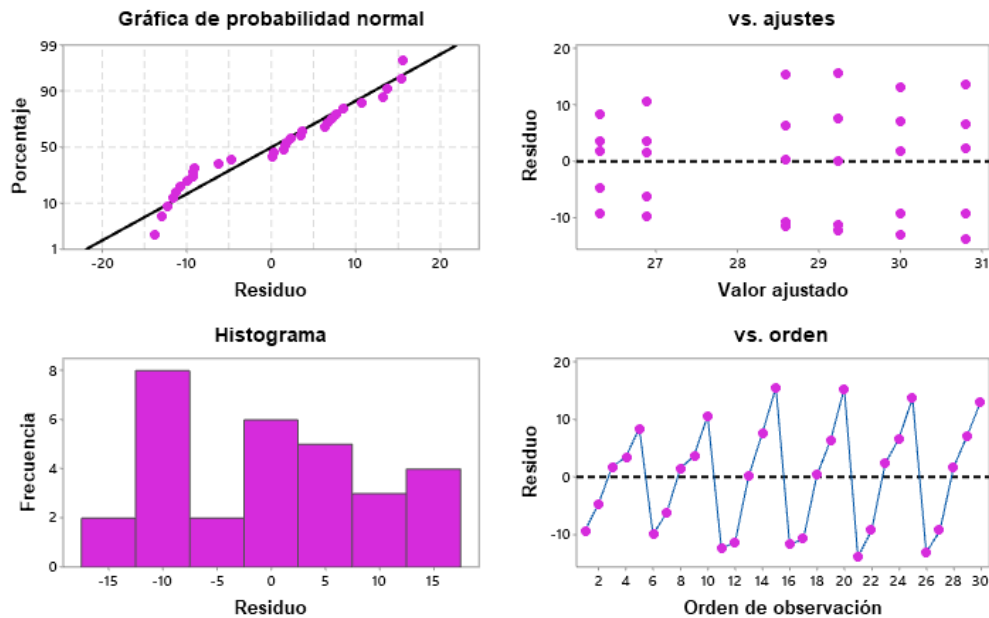


Figura 40 Gráfica de Residuos de CHL.

V.4.6 Consumo de Agua.

Tabla 8 Agrupación de Datos de Consumo de Agua.

TRATAMIENTOS	N	Media	Agrupación
33.00%	5	7.46	A
0.00%	5	7.27	A
100.00%	5	7.24	A
66.00%	5	7.24	A
101.00%	5	7.09	A
133.00%	5	7.04	A

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Diferencias de las medias para H2O

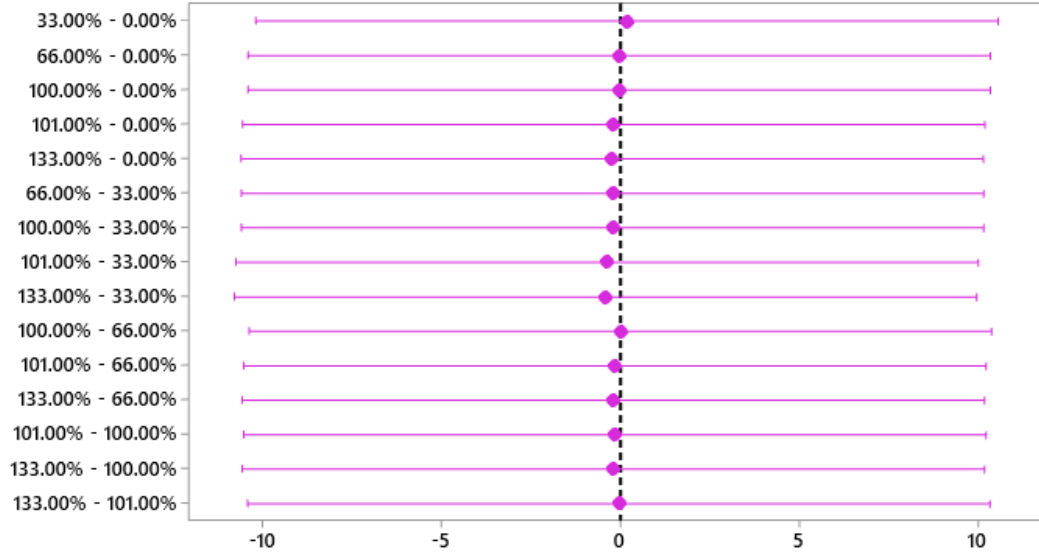


Figura 41 Diferencias para las medias de los tratamientos Consumo de Agua.

Gráfica de intervalos de H2O vs. TRATAMIENTOS

95% IC para la media

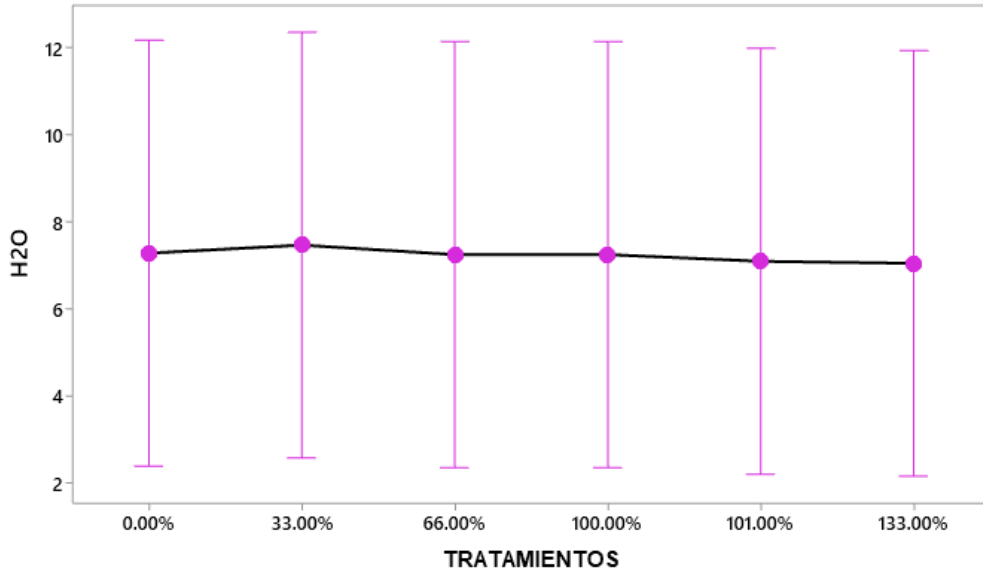


Figura 42 Intervalos para los tratamientos Consumo de Agua.

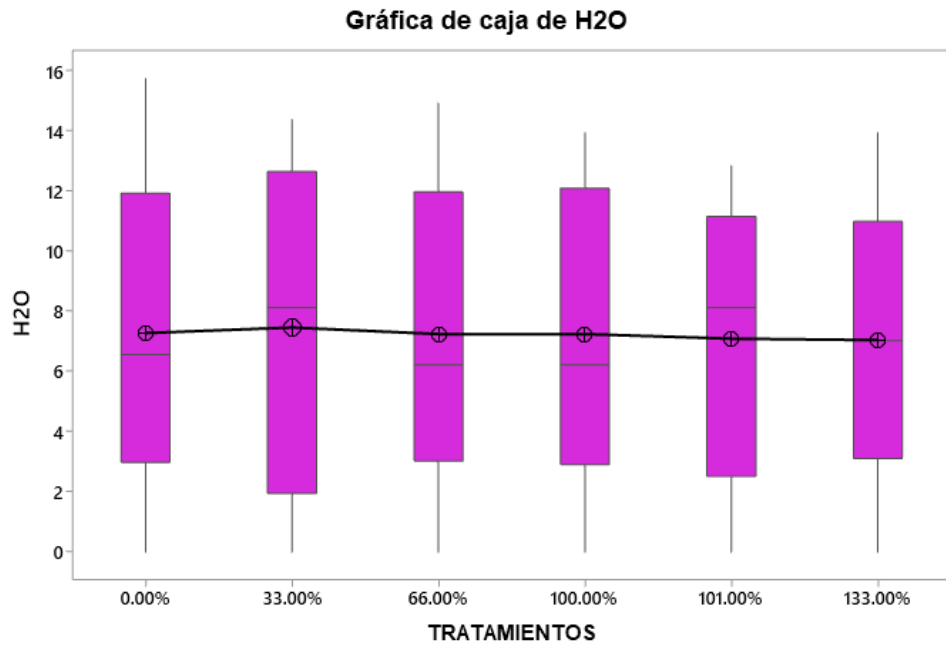


Figura 43 Gráfica de Caja Consumo de Agua

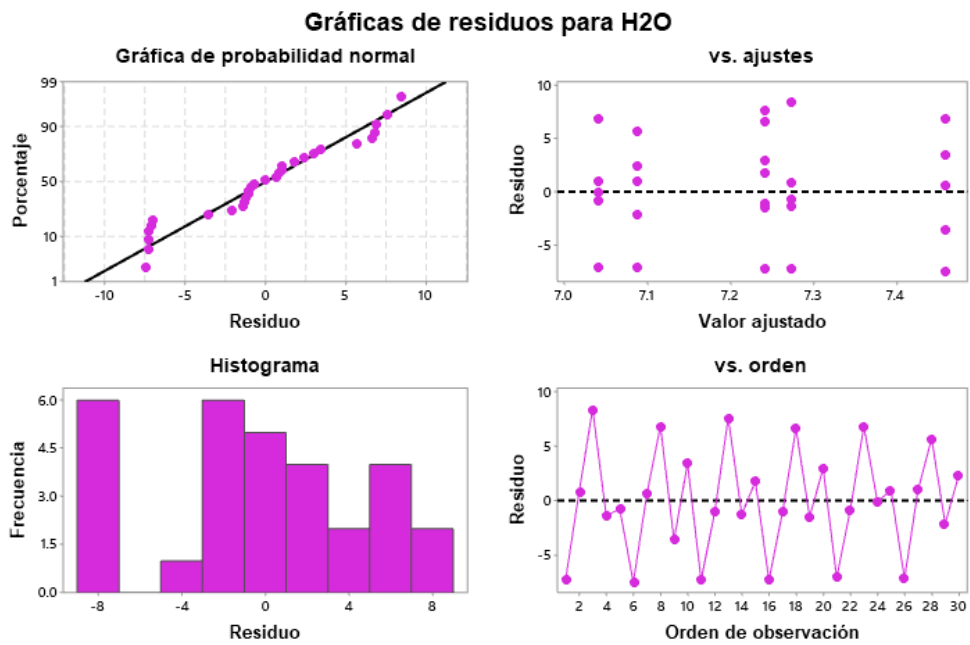


Figura 44 Gráfica de Residuos de Consumo de Agua.

V.4.7 Análisis de Correlación entre Variables.

Para el análisis de correlación, se hizo uso de un programa en Python para poder correlacionar las variables vs los tratamientos y entre ellas mismas, el código fuente se puede encontrar en la sección de Anexos “XI.4 Código Matriz de Correlación.”

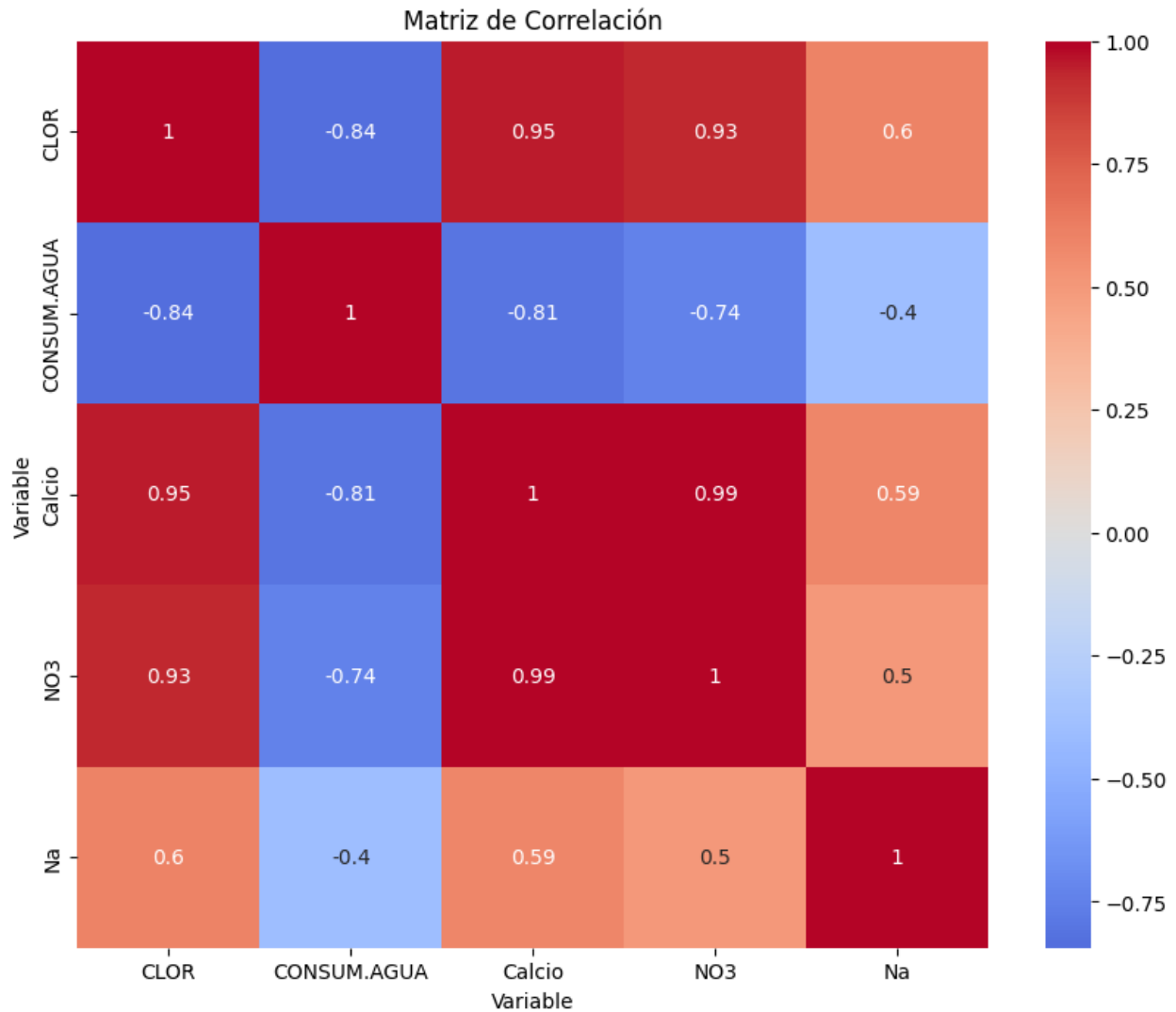


Figura 45 Matriz de Correlación entre Variables.

V.5 Discusión de Datos.

Derivado de lo anteriormente mencionado en el punto de los resultados por réplica, la discusión que en el presente trabajo se menciona está delimitada solamente a los análisis estadísticos en sí. La discusión científica estará disponible en un artículo que el autor del experimento tendrá a bien disponer en alguna revista científica.

V.5.1 pH

Se encontraron diferencias significativas entre el control, 33%, 133% y 66%, entre sí, tal cual se muestra en la gráfica del punto V.4.1 pH, ahora bien, el comportamiento de control es a la baja, mientras que 33% tiende al alza, el pH se muestra más estable y amortiguado en 100%.

V.5.2 NO³ en Solución Nutritiva.

Por su parte, los nitratos presentes en la solución nutritiva presentan diferencias significativas para todos los tratamientos, excepto para el control, 100% y 133%, la presencia más baja de nitratos fue en 0%, sin embargo, al final del experimento no fue de 0. Para el final del experimento, el tratamiento que tuvo mayor concentración de nitratos fue 133%, sin embargo, este último y 100% fueron los que no solo mantuvieron, sino que elevaron la carga de NO³⁻ disponibles en la solución nutritiva.

V.5.3 Calcio en Solución Nutritiva.

Por su parte, el calcio no tuvo diferencias significativas en los tratamientos, lo cual es benéfico debido a que la sinergia y disponibilidad entre el mismo y nitrógeno no afectó en los tratamientos. La mayor cantidad de calcio se logró observar en 133% y la más baja en 0%. Cabe mencionar que 100% tuvo una mayor concentración (sin diferencias significativas) respecto al control. Todas las variables de todos los tratamientos exceptuando el nitrógeno comenzaron iguales.

V.5.4 Sodio en Solución Nutritiva.

Para el sodio se muestra una relación similar a la del calcio, sin embargo, cabe mencionar que la acumulación del mismo incrementó más en 0% y 66% respecto a lo que supone el autor como normal. 133% tuvo la mayor cantidad del mismo, y el control tuvo la menor cantidad de este.

V.5.5 Clorofila

Por otro lado, en clorofila no hubo diferencias significativas entre los tratamientos, lo que supone una buena señal para el autor debido a que la sinergia de las asociaciones supuso una excelente combinación. 133% tuvo una mayor concentración de esta, mientras que 0% fue la que presentó menor concentración. Cabe mencionar que en 66% el balance de nitrógeno fue perfecto, lo que supuso una mayor cantidad de clorofila asimilada por las plantas que en 100%.

V.5.6 Consumo de Agua.

El consumo de agua fue similar en todos los tratamientos, puesto que en el análisis de diferencias no se presentaron estas mismas de manera significativa, sin embargo, el consumo de agua fue mayor en 33%, mientras que el mayor ahorro se presentó en 133%, con una media de 7.46L y 7.04L semanales.

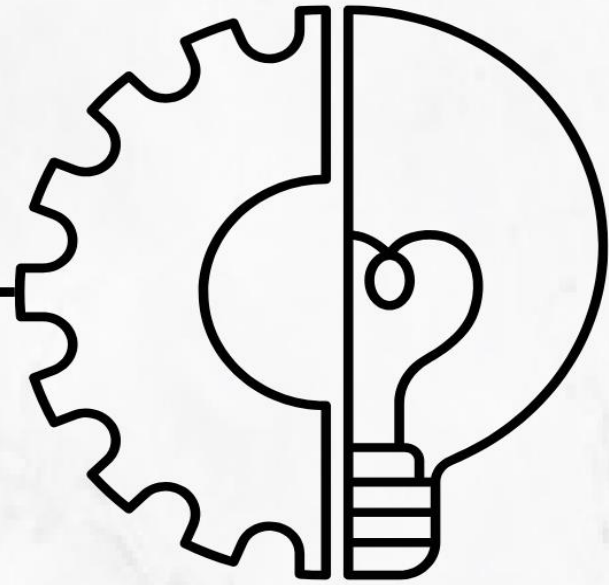
V.5.7 Análisis de Correlación entre Variables.

Se presentaron correlaciones negativas como positivas, por un lado cabe mencionar que la correlación entre el calcio y la clorofila es muy alta ($r=0.95$), así como con calcio y nitrógeno ($r=99\%$), como ya se había mencionado en el marco teórico, los nitratos están altamente correlacionados con la clorofila ($r=0.93$), por otro lado se encuentran correlaciones negativas entre el consumo de agua y el calcio ($r=0.81$), la clorofila y el consumo de agua con un $r=-0.84$, y los nitratos con el consumo de agua $r=0.74$.

V.6 Redacción de Resultados.

Se logró elaborar una tesis que sustenta de manera sólida y coherente los objetivos planteados al inicio del proyecto. La estructura de la tesis se diseñó cuidadosamente para presentar de manera lógica y ordenada los hallazgos, gráficas, análisis, discusiones generales, etc., obtenidos durante la investigación.

- i. **Marco Teórico:** Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente, lo que permitió adoptar la información, aprenderla y procesarla con el fin de fundamentar teóricamente el estudio y establecer un contexto claro para la investigación.
- ii. **Metodología:** Se describieron detalladamente los métodos utilizados para la recolección y análisis de datos, se aprendió a usar una gran variedad de equipos para el análisis y recolección de datos, garantizando la replicabilidad del estudio y la validez de los resultados.
- iii. **Análisis de Datos:** Se aplicaron técnicas estadísticas avanzadas, como el análisis de varianza (ANOVA) y el test de Tukey, para identificar diferencias significativas entre los tratamientos y evaluar la relación entre las variables.
- iv. **Discusión:** Los resultados obtenidos se lograron recopilar y explicar de tal manera que el autor del experimenta pudiese comprobar como compararon con estudios previos, corroborar o contradecir hipótesis anteriores y ofrecer nuevas perspectivas sobre el tema investigado., sin embargo, el análisis de este, no se muestra en la presente tesis.
- v. **Conclusiones y Recomendaciones:** Se sintetizaron los principales hallazgos y se presentaron recomendaciones prácticas basadas en los resultados obtenidos, ofreciendo orientación para futuras investigaciones.



CAPÍTULO 6:

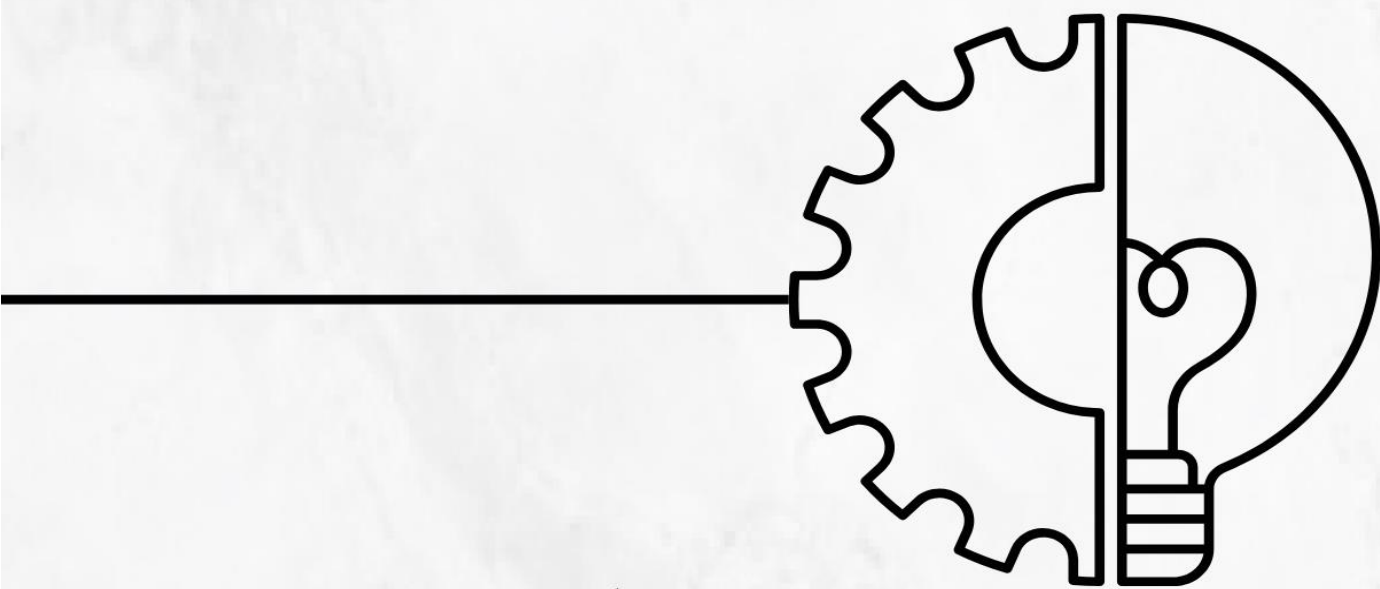
CONCLUSIONES

VI.1 Conclusiones Generales.

La evaluación de la eficacia de diferentes variables ambientales y de manejo sobre la fijación de nitrógeno, mediante técnicas como ANOVA y análisis de correlación, permitió identificar interacciones significativas entre las variables estudiadas. Los resultados mostraron diferencias significativas en el pH, nitratos en solución nutritiva, calcio, sodio y clorofila, reflejando el impacto de los tratamientos aplicados.

La implementación de análisis estocásticos proporcionó una comprensión más profunda de la variabilidad y aleatoriedad en la fijación de nitrógeno. Las simulaciones y distribuciones probabilísticas permitieron predecir resultados bajo diversas condiciones, mejorando la capacidad de toma de decisiones en el manejo agrícola. Por otro lado, la identificación de variables críticas y la aplicación de técnicas estadísticas no estocásticas contribuyeron a reducir la varianza y mejorar la fiabilidad de las conclusiones. Esto permitió optimizar el entorno biomecatrónico, maximizando la eficiencia de la fijación de nitrógeno.

Así pues, el análisis detallado de los datos reveló comportamientos y tendencias significativas en las variables estudiadas. Se observaron correlaciones importantes entre el calcio, clorofila, nitrógeno y el consumo de agua, destacando la compleja interacción entre estos elementos en el sistema de agricultura vertical. La tesis se estructuró de manera sólida y coherente, presentando los hallazgos, gráficas y análisis de forma lógica. Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura y se describieron detalladamente los métodos utilizados, asegurando la validez y replicabilidad del estudio. Las conclusiones y recomendaciones ofrecen una guía práctica para futuras investigaciones en el campo. El proyecto demostró la importancia de aplicar métodos estadísticos avanzados para optimizar la fijación de nitrógeno en sistemas de agricultura vertical, proporcionando una base sólida para mejorar las prácticas agrícolas y fomentar un uso más eficiente de los recursos en entornos biomecatrónicos.



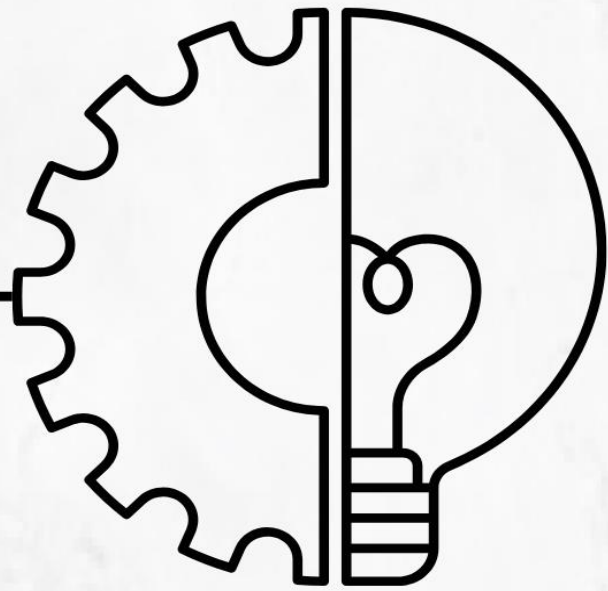
CAPÍTULO 7:

COMPETENCIAS
DESARROLLADAS

VII.1 Competencias Desarrolladas y/o Aplicadas.

Al llevar a cabo este proyecto, desarrollé y apliqué las siguientes competencias:

- i. Utilicé técnicas como ANOVA y ANCOVA para evaluar la interacción entre variables ambientales y de manejo, interpretando los resultados de manera rigurosa y asegurando la precisión en la identificación de patrones en la fijación de nitrógeno.
- ii. Apliqué conocimientos de estadística aplicando una perspectiva sistémica que me permitió abordar problemas complejos y proponer soluciones innovadoras.
- iii. Desarrollé conocimientos sobre agricultura vertical y conceptos relacionados a la misma.
- iv. Desarrollé la habilidad de interpretar datos experimentales de forma crítica, fundamentando decisiones clave en análisis cuantitativos y cualitativos para mejorar los procesos de fijación de nitrógeno.
- v. Implementé planes y programas de seguridad e higiene para el fortalecimiento del entorno laboral.
- vi. Apliqué métodos, técnicas y herramientas para la solución de problemas.
- vii. Apliqué métodos de investigación para desarrollar e innovar modelos, sistemas, y procesos en las diferentes dimensiones de la organización.
- viii. Utilicé nuevas tecnologías de información y comunicación en la organización, para optimizar los procesos y la eficaz toma de decisiones.
- ix. Utilicé técnicas y métodos cualitativos y cuantitativos para la toma de decisiones



CAPÍTULO 8:

FUENTES DE INFORMACIÓN

VIII.1 Bibliografía.

AECOC. (2023). *Nuevas formas de producir alimentos en agricultura vertical*. Perú 33 p. Consultado el 20 de octubre de 2024. Disponible en <https://www.aecoc.es/innovation-hub-noticias/nuevas-formas-de-produciralimentos-agricultura-vertical/>.

Agricultura. *Qué es la agricultura vertical y cuál es su importancia*. Costa-Rica. Consultado el 15 octubre de 2024. Disponible en <https://blogagricultura.com/importanciaagriculturavertical/#:~:text=La%20agricultura%20vertical%20permite%20cultivar,de%2>

Agrovita. *La gran importancia del nitrógeno en las plantas*. Consultado el 10 de octubre de 2024 de <https://www.agrovitra.com/media/2022/12/Importancia-del-Nitrogeno-en-las-plantas-Fernanda-Habit.pdf>

Agro tendencia. (2020). *Granja vertical: qué es, tipos, beneficios y desventajas*. (en línea). San Lorenzo 25 p. Consultado el 4 de septiembre de 2024. Disponible en <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos/granja-vertical-fabrica-deplantas/>.

Arredondo, I. (2023). *Análisis de varianza (ANOVA) – Columna de investigación DATLAS*. Blog Datlas. Consultado el 4 de septiembre de 2024. Disponible en <https://blogdatlas.wordpress.com/2023/08/20/analisis-de-varianza-anova-columna-de-investigacion-datlas/>

Calvo G., S. (2011). *Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno*. Consultado el 02 de octubre de 2024. Disponible en file:///C:/Users/lap_l/Downloads/Dialnet-BacteriasSimbioticasFijadorasDeNitrogeno-3761553.pdf

Canales, C., & Suguey, D. (2023). *Agricultura vertical para aumentar la producción de alimentos en áreas urbanas*. Babahoyo: UTB. Recuperado el 26 de Octubre de 2024 de <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14796>

Cruz, D. C., Cabrera, E. P., Vázquez, M. A., & Gómez, C. V. (2019). *Nitrógeno: ¿Elemento esencial? Importancia en la Química de los Productos Naturales*. Guanajuato, Gto. Consultado el 02 de noviembre de 2024, en

<https://www.researchgate.net/publication/370225506> *HERRAMIENTAS ESTADÍSTICA S para la investigación en ciencias agrarias*

Modelos estocásticos: aplicaciones & ejemplos | StudySmarter. Consultado el 15 de septiembre de 2024 de <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-quimica/modelos-estocasticos/>

Novagric. (2022). *Módulo de la Agricultura Vertical. Nuevos retos de la agricultura moderna*. Consultado el 20 de octubre de 2024. Disponible. <https://novagric.com/cultivos/agricultura-vertical/>

Quinteros, M., Alonso, A., Escudero, L., Guignard, M. y A. Weintraub. (2006). *Una aplicación de programación estocástica en un problema de gestión forestal*. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 20:67-95.

Santos, S. E. (2010). *Química Y Cultura Científica*. UNED. Disponible en <https://books.google.com.mx/books?id=z09Vyr9DBEC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

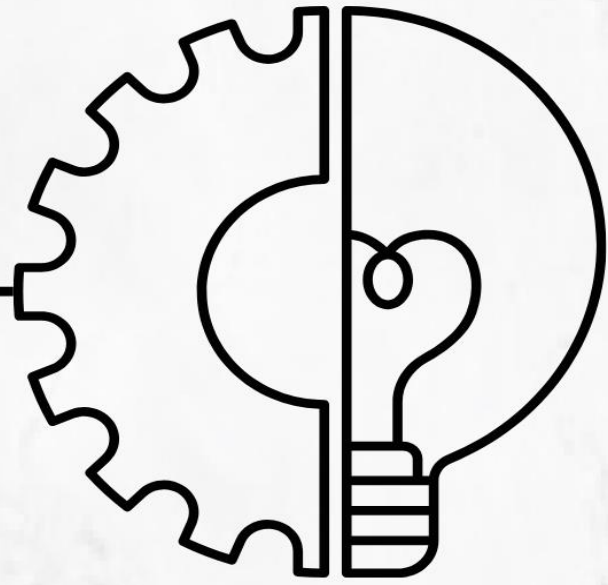
Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). *Nutrient solutions for hydroponic systems*. *Hydroponics-a standard methodology for plant biological researches*, 1, 1-22

Seerat Jan, Zahida Rashid, Tanveer Ahmad Ahngar, Sadaf Iqbal, M. Abbass Naikoo, Shabina Majeed, Tauseef Ahmad Bhat, Razia Gul and Insha Nazir. 2020. *Hydroponics – A Review*. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 9(08): 1779-1787. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.908.206>

Rotz, C. A., Buckmaster, D. R. and J. W. Comerford. (2005^a). *A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm system*. *Journal Animal Science*, 83:231-242.

Ruiz, A., G. ANÁLISIS DE COVARIANZA. Consultado el 15 de noviembre de 2024. Disponible en http://revistasbolivianas.umsa.bo/pdf/rv/n15/n14_a08.pdf


Wallace, S. (2023). *¿Qué debes de saber acerca de la agricultura vertical?*. Recuperado el 27 de septiembre de 2024. Disponible <https://www.pthorticulture.com/es-us/centro-de-formacion/que-debes-de-saber-acerca-de-la-agricultura-vertical>



CAPÍTULO 9:

ANEXOS

IX.1 Carta de Aceptación.

 EDUCACIÓN <small>SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA</small>	 TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO	Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga DEPI TecNM de Pabellón de Arteaga Laboratorio de Iluminación Artificial
--	---	--

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, **11/septiembre/2024**
Oficio No. 12-a

Asunto: Carta de Aceptación de Residencia Profesional

DR. JOSÉ ERNESTO OLVERA GONZÁLEZ
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA.



AT N: ANGIE JOHANNA ZAMORA LÓPEZ
JEFA DEL DEPTO. GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN



PRESENTE:

Por este conducto, me permito informar que la **C. AMÉRICA JANETH JAIME REYES**, con número de control **201050286**, alumna de la carrera de: **ING. INDUSTRIAL**, ha sido **ACEPTADA** para realizar su Residencia Profesional en el TecNM Campus Pabellón de Arteaga - Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA), bajo el proyecto denominado **"MÉTODOS ESTADÍSTICOS AVANZADOS, ESTOCÁSTICOS Y NO ESTOCÁSTICOS, PARA LA EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES EN LA FIJACIÓN DE NITRÓGENO EN UN ENTORNO BIOMECASTRÓNICO DE AGRICULTURA VERTICAL"**, durante el periodo comprendido de **AGOSTO-DICIEMBRE 2024**.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
"Tierra Siempre Fértil"®

 NIVIA IRACEM ESCALANTE GARCÍA COORDINADORA LIA ccp. Archivo NIEG/brc	 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
--	--

	 2024 Felipe Carrillo PUERTO
---	---

Carretera a la Estación de Rincón Km. 1 C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel. 465 958-2482 Ext. 104 e-mail: plan_parteaga@tecnm.mx tecnm.mx | pabellon.tecnm.mx


 Escaneado con CamScanner

Figura 46 Carta de Aceptación.

XI.2 Carta de Liberación.

 EDUCACIÓN <small>SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA</small>	 TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO	Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga DEPI TecNM de Pabellón de Arteaga Laboratorio de Iluminación Artificial
--	---	--

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, **06/diciembre/2024**
Oficio No. 016-A/2024

Asunto: Carta de liberación de residencias profesionales.

DR. JOSÉ ERNESTO OLVERA GONZÁLEZ
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE PABELLÓN DE ARTEAGA.

AT'N: ANGIE JOHANNA ZAMORA LÓPEZ
JEFA DEL DEPTO. GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE:

Por este conducto, me permito informarle que la C. América Janeth Jaime Reyes con número de control 201050286, alumna de la carrera de: Ing. Industrial, concluyó satisfactoriamente su Residencia profesional en el TecNM Campus Pabellón de Arteaga - Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA), donde cubrió un total de 500 horas, a partir del día 09 de agosto al 06 de diciembre 2024, con el proyecto nombrado "Métodos estadísticos avanzados, estocásticos y no estocásticos, para la evaluación en interpretación de variables en la fijación de nitrógeno en un entorno biomecatrónico de agricultura vertical".

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Tierra Siempre Fértil"®


NIVIA IRACEM ESCALANTE GARCÍA
COORDINADORA LIA
ccp. Archivo
NIEG/brc


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN



Carretera a la Estación de Rincón Km. 1 C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel. 465 958-2482 Ext. 104 e-mail: plan_parteaga@tecnm.mx tecnm.mx |





Figura 47. Carta de Liberación

XI.3 Código Palangana

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from mpl_toolkits.mplot3d.art3d import Poly3DCollection
R = 23.25 # Radio mayor en cm
r = 19.75 # Radio menor en cm
h_total = 34.8 # Altura total en cm

def calcular_volumen_tronco_cono(R, r, h, h_total):
    R_h = R * (h / h_total) # Radio mayor a esa altura
    r_h = r * (h / h_total) # Radio menor a esa altura
    V_h = (1/3) * np.pi * h * (R_h**2 + R_h * r_h + r_h**2)
    litros = V_h / 1000 # Convertir a litros
    return litros

data = []
for h in range(1, int(h_total)+1):
    litros = calcular_volumen_tronco_cono(R, r, h, h_total)
    data.append([h, litros])
df = pd.DataFrame(data, columns=['Altura (cm)', 'Volumen (litros)'])
print(df)

def dibujar_tronco_cono_3d(R, r, h):
    theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, 100)
    x_top = R * np.cos(theta)
    y_top = R * np.sin(theta)
    z_top = np.full_like(x_top, h)
    x_bottom = r * np.cos(theta)
    y_bottom = r * np.sin(theta)
    z_bottom = np.zeros_like(x_bottom)
    fig = plt.figure()
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax.xaxis.pane.fill = True
    ax.yaxis.pane.fill = True
    ax.zaxis.pane.fill = True
    ax.xaxis.pane.set_edgecolor('w')
    ax.yaxis.pane.set_edgecolor('w')
    ax.zaxis.pane.set_edgecolor('w')
    ax.xaxis.pane.set_facecolor('w')
    ax.yaxis.pane.set_facecolor('w')
    ax.zaxis.pane.set_facecolor('w')
    ax.plot(x_top, y_top, z_top, label='Base Superior', color='pink')
    ax.plot(x_bottom, y_bottom, z_bottom, label='Base Inferior', color='purple')
    for i in range(len(theta)):
```

```

ax.plot([x_top[i], x_bottom[i]], [y_top[i], y_bottom[i]], [z_top[i],
z_bottom[i]], color='GRAY')
vertices_top = [list(zip(x_top, y_top, z_top))]
vertices_bottom = [list(zip(x_bottom, y_bottom, z_bottom))]
ax.add_collection3d(Poly3DCollection(vertices_top, facecolors='pink',
linewidths=1, edgcolors='pink', alpha=.15))
ax.add_collection3d(Poly3DCollection(vertices_bottom, facecolors='purple',
linewidths=1, edgcolors='purple', alpha=.35))
ax.xaxis._axinfo['grid'].update(color='gray', linestyle='--', linewidth=0.5)
ax.yaxis._axinfo['grid'].update(color='gray', linestyle='--', linewidth=0.5)
ax.zaxis._axinfo['grid'].update(color='gray', linestyle='--', linewidth=0.5)
ax.set_xlabel('X (cm)')
ax.set_ylabel('Y (cm)')
ax.set_zlabel('Z (cm)')
ax.set_title('Aproximación Palangana 50L')
plt.legend()
plt.show()

```

dibujar_tronco_cono_3d(23.25, 19.75, 34.8)

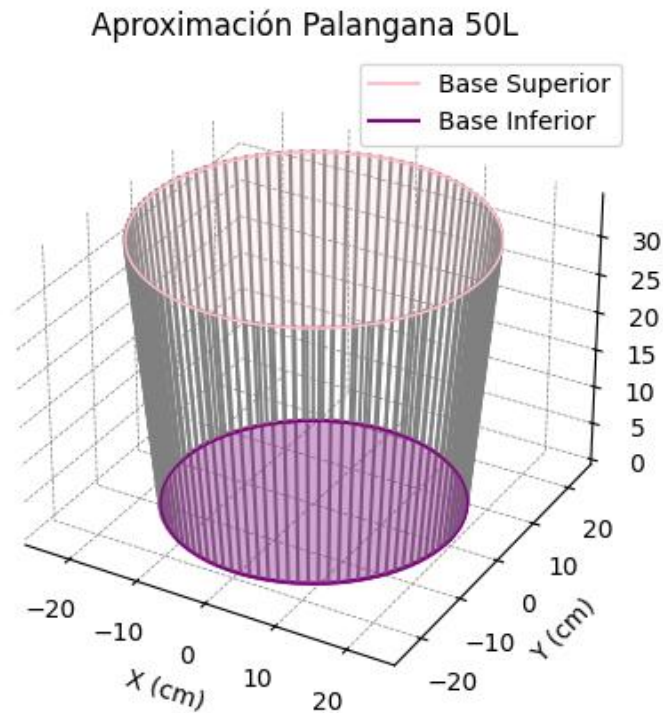


Figura 48 Palangana de Plástico

XI.4 Código Matriz de Correlación.

```
import pandas as pd
from scipy.stats import pearsonr
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import statsmodels.api as sm
from statsmodels.formula.api import ols
from tabulate import tabulate

# Cargar los datos desde los archivos CSV
na_data = pd.read_csv('C:/Users/luisd/OneDrive/Escritorio/Ca.csv', header=None)
calcio_data = pd.read_csv('C:/Users/luisd/OneDrive/Escritorio/Na.csv',
header=None)
Clo = pd.read_csv('C:/Users/luisd/OneDrive/Escritorio/Clo.csv', header=None)
mg_data = pd.read_csv('C:/Users/luisd/OneDrive/Escritorio/NO3.csv', header=None)
consa = pd.read_csv('C:/Users/luisd/OneDrive/Escritorio/consa.csv', header=None)

# Verificar el número de filas en cada DataFrame
print(f"na_data tiene {len(na_data)} filas")
print(f"calcio_data tiene {len(calcio_data)} filas")
print(f"Clo tiene {len(Clo)} filas")
print(f"mg_data tiene {len(mg_data)} filas")
print(f"consa tiene {len(consa)} filas")

# Asignar las columnas para tratamiento y medición con la longitud adecuada
na_data['Tratamiento'] = range(1, len(na_data) + 1)
calcio_data['Tratamiento'] = range(1, len(calcio_data) + 1)
Clo['Tratamiento'] = range(1, len(Clo) + 1)
mg_data['Tratamiento'] = range(1, len(mg_data) + 1)
consa['Tratamiento'] = range(1, len(consa) + 1)

# Convertir a formato largo (long format)
na_data = na_data.melt(id_vars='Tratamiento', var_name='Medición',
value_name='Valor')
na_data['Variable'] = 'Na'

calcio_data = calcio_data.melt(id_vars='Tratamiento', var_name='Medición',
value_name='Valor')
calcio_data['Variable'] = 'Calcio'

Clo = Clo.melt(id_vars='Tratamiento', var_name='Medición', value_name='Valor')
Clo['Variable'] = 'CLOR'
```



```

mg_data = mg_data.melt(id_vars='Tratamiento', var_name='Medición',
value_name='Valor')
mg_data['Variable'] = 'NO3'

consa = consa.melt(id_vars='Tratamiento', var_name='Medición',
value_name='Valor')
consa['Variable'] = 'CONSUM.AGUA'

# Combinar todos los DataFrames
data = pd.concat([na_data, calcio_data, Clo, mg_data, consa])

# Crear un DataFrame para almacenar los resultados de las correlaciones
results_list = []

# Calcular las correlaciones
variables = ['Na', 'Calcio', 'CLOR', 'NO3', 'CONSUM.AGUA']
tratamientos = data['Tratamiento'].unique()

for t in tratamientos:
    for i in range(len(variables)):
        for j in range(i+1, len(variables)):
            var1_data = data[(data['Variable'] == variables[i]) &
(data['Tratamiento'] == t)]
            var2_data = data[(data['Variable'] == variables[j]) &
(data['Tratamiento'] == t)]

            # Asegurarse de que las series están alineadas correctamente
            if not var1_data['Medición'].equals(var2_data['Medición']):
                raise ValueError("Las mediciones no están alineadas
correctamente.")

            correlacion, p_valor = pearsonr(var1_data['Valor'],
var2_data['Valor'])
            results_list.append({'Variable1': variables[i], 'Variable2':
variables[j], 'Tratamiento': t, 'Correlación': correlacion, 'p-valor': p_valor})

# Convertir la lista de resultados a un DataFrame
results = pd.DataFrame(results_list)

# Crear una matriz de correlación usando pivot_table
corr_matrix = data.pivot_table(index='Tratamiento', columns='Variable',
values='Valor').corr()

# Visualizar la matriz de correlación
plt.figure(figsize=(10, 8))

```

```
sns.heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap='coolwarm', center=0)
plt.title('Matriz de Correlación')
plt.show()

# Realizar ANOVA y presentar los resultados en tablas
print("\nResultados del ANOVA:")
for variable in variables:
    model = ols(f'Valor ~ C(Tratamiento)', data=data[data['Variable'] ==
variable]).fit()
    anova_table = sm.stats.anova_lm(model, typ=2)
    print(f"\nANOVA para {variable}:")
    print(tabulate(anova_table, headers='keys', tablefmt='pretty'))
```