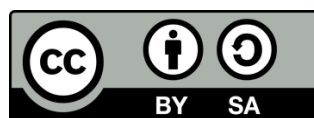


EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LECHUGA HIDROPÓNICA
(*LACTUCA SATIVA* VAR. CRISPA) EN SUSTRATOS CON APROVECHAMIENTO DE
RESIDUOS PLÁSTICOS PET EN EL MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO, META.



LAURA VALERIA AVENDAÑO GARCÍA

LUISA FERNANDA CORTÉS PEÑA



UNIVERSIDAD SANTO TOMAS VILLAVICENCIO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2020

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LECHUGA HIDROPÓNICA
(*LACTUCA SATIVA* VAR. CRISPA) EN SUSTRATOS CON APROVECHAMIENTO DE
RESIDUOS PLÁSTICOS PET EN EL MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO, META.

LAURA VALERIA AVENDAÑO GARCÍA

LUISA FERNANDA CORTÉS PEÑA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Asesor

JORGE IVÁN CASTILLO ROJAS

Ingeniero Agrónomo Esp. Gerencia de Proyectos

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS VILLAVICENCIO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2020

Autoridades Académicas

P. JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

Rector General

P. EDUARDO GONZALES GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano de Facultad

JORGE IVÁN CASTILLO ROJAS

Director Trabajo de Grado

RODRIGO ISAAC VELOSA CAICEDO

Jurado

ALFONSINA BOCANEGRA GOMEZ

Jurado

Villavicencio, Mayo 2020

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar Dios por un logro más, a nuestros padres, que con sus esfuerzos hicieron lo posible por brindarnos la mejor educación dentro de sus posibilidades para formarnos como profesionales, nos brindaron su apoyo incondicional y son nuestro ejemplo de dedicación, perseverancia y humildad. De igual forma, queremos agradecer a cada uno de los docentes de la facultad de ingeniería ambiental quienes fueron partícipes de nuestra formación, nos incentivaron a continuar y ser mejores en nuestras áreas de interés, a la decana de la facultad que nos brindó asesoramiento en la ejecución del presente y a nuestros compañeros que nos acompañaron durante los semestres por su apoyo y consejos.

Finalmente, agradecemos tanto a nuestro director de proyecto Jorge Castillo por los conocimientos brindados, la paciencia y el acompañamiento, como a nuestra codirectora, los evaluadores del trabajo de grado y la Universidad Santo Tomas Villavicencio que nos permitieron cumplir el objetivo de esta etapa de cinco años tan importante en nuestras vidas.

Contenido

	Pág.
1. Resumen	12
2. Introducción.....	13
3. Planteamiento del problema	14
4. Objetivos.....	16
4.1. Objetivo General	16
4.2. Objetivos específicos.....	16
5. Justificación.....	17
6. Antecedentes.....	19
7. Marco de referencia	22
7.1. Marco teórico	22
7.2. Marco conceptual	24
7.2.1. Tereftalato de polietileno	24
7.2.2. Elementos de la hidroponía.....	25
7.2.3. Desarrollo e índices de crecimiento	26
7.2.4. Ecología, características y propiedades de la lechuga	28
7.3. Marco Legal	28
8. Metodología.....	30
8.1. Ubicación de la zona de estudio	30
8.2. Caracterización de la zona de estudio	30
8.3. Tipo de metodología implementada.....	30
8.4. Fase de planeación	31
8.4.1. Estructuración del diseño del sistema	31

8.4.2.	Distribución de los tratamientos experimentales	32
8.4.3.	Distribución de los sustratos en el montaje	32
8.4.4.	Rótulos y numeración de las plantas.....	33
8.5.	Fase de ejecución	33
8.5.1.	Obtención de las plántulas	33
8.5.2.	Obtención de sustratos	34
8.5.3.	Adecuación y desinfección de sustratos	34
8.5.4.	Adquisición de equipos.....	35
8.5.5.	Limpieza del montaje.....	36
8.5.6.	Preparación de la solución nutritiva.....	36
8.5.7.	Trasplante de plántulas	38
8.5.8.	Monitoreos	38
8.6.	Fase de valoración.....	40
8.6.1.	Recolección de datos finales.....	40
8.6.2.	Tratamiento estadístico inicial	41
8.6.3.	Aplicación de índices de crecimiento	41
8.6.4.	Análisis de covarianza ANOVA.....	42
9.	Resultados y análisis.....	43
9.1.	Estructuración del sistema.....	43
9.1.1.	Diseño de sistema hidropónico vertical.	43
9.1.2.	Incorporación y distribución de sustratos	46
9.2.	Adecuación y monitoreo de elementos del montaje	47
9.2.1.	Recepción y adecuación de plántulas	47
9.2.2.	Adecuación y desinfección de sustratos	48
9.2.3.	Limpieza del montaje.....	48

9.2.4.	Pre trasplante.....	49
9.2.5.	Trasplante de plántulas	52
9.3.	Monitoreos	53
9.3.1.	Registro de condiciones microclimáticas.....	53
9.3.2.	Registro de concentraciones de la solución nutritiva.....	54
9.3.3.	Registro de crecimiento de plantas	55
9.4.	Valoración de datos finales	57
9.4.1.	Tratamiento estadístico inicial de datos finales	57
9.4.2.	Índices de crecimiento	63
9.4.3.	Análisis de covarianza ANOVA.....	68
10.	Discusión de resultados	71
11.	Conclusiones.....	72
12.	Recomendaciones	73
13.	Referencias.....	74

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resultados para sistemas hidropónicos empleando sustratos inorgánicos.....	21
Tabla 2. Generalidades del plástico PET.	24
Tabla 3. Requerimientos funcionales de los sustratos	25
Tabla 4. Requerimientos de las soluciones.	26
Tabla 5. Índices de crecimiento para plantas.	27
Tabla 6. Marco legal con relación al sector ambiente.....	29
Tabla 7. Desinfección de sustratos.....	35
Tabla 8. Caracterización de equipos	35
Tabla 9. Parámetros de la solución nutritiva.....	36
Tabla 10. Composición garantizada del fertilizante.....	37
Tabla 11. Promedio de variables de la solución nutritiva.	54
Tabla 12. Historial de crecimiento para tratamiento de control (Tc).....	55
Tabla 13. Historial de crecimiento para tratamiento uno (T1).....	55
Tabla 14. Historial de crecimiento para tratamiento dos (T2)	56
Tabla 15. Historial de crecimiento para tratamiento tres (T3).....	56
Tabla 16. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento de control (Tc).	57
Tabla 17. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento uno (T1)	58
Tabla 18. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento dos (T2).....	59
Tabla 19. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento tres (T3).	60
Tabla 20. Índice de crecimiento relativo para longitud de tallo.....	63
Tabla 21. Índice de crecimiento relativo para largo de hoja.	63
Tabla 22. Índice de crecimiento relativo para ancho de hoja.....	64
Tabla 23. Aplicación del índice de área foliar (IAF)	66
Tabla 25. Prueba de covarianza ANOVA para variables morfológicas.	68
Tabla 24. Prueba de homogeneidad de varianzas.	68
Tabla 26. Comparaciones múltiples HSD de Tukey	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Distribución de los tratamientos experimentales en el montaje	32
Figura 2. Rotulación de plantas en el montaje	33
Figura 3. Dimensiones del montaje hidropónico	43
Figura 4. Vista frontal del montaje hidropónico	44
Figura 5. Dimensiones de tubos PVC de crecimiento	44
Figura 6. Vista frontal de los componentes del montaje hidropónico	45
Figura 7. Vista lateral de los componentes del montaje hidropónico	45
Figura 8. Diseño de invernadero tipo túnel	46
Figura 9. Adecuación de plantas de lechuga	47
Figura 10. Limpieza y desinfección de sustratos	48
Figura 11. Limpieza interna del montaje	49
Figura 12. Adecuación del sistema de filtración	49
Figura 13. Montaje hidropónico bajo invernadero.	51
Figura 14. Preparación de tratamientos experimentales	51
Figura 15. Trasplante de plantas a montaje hidropónico	52
Figura 16. Promedio diario de humedad para invernadero	53
Figura 17. Promedio diario de temperatura para invernadero	54
Figura 18. Comparativo de datos finales para medias de número de hojas	61
Figura 19. Media general de valores finales para variables morfológicas	62
Figura 20. Curva de fitomasa aérea para largo de hojas	65
Figura 21. Curva de fitomasa aérea para ancho de hojas	65
Figura 22. Curva de fitomasa subterránea para largo de tallo	66

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Volumen para tubos de crecimiento.....	32
Ecuación 2. Disolución del desinfectante NaClO.....	35
Ecuación 3. Igualdad de Partes por millón expresada en función de masa.....	37
Ecuación 4. Obtención de la masa del solvente	38
Ecuación 5. Concentración para soluciones con mezcla homogénea	39
Ecuación 6. Concentración aplicada para corrección de la solución nutritiva.....	40

1. Resumen

En la actualidad, la hidroponía desde sus diversas modalidades, se perfila dentro de los proyectos enfocados hacia el desarrollo sostenible, pues permite generar cultivos con bajo consumo del recurso hídrico, la adaptación de materiales químicamente inertes y el aprovechamiento de residuos altamente generados como el tereftalato de polietileno (PET) en sustratos.

Se realizó la evaluación del crecimiento de hortalizas de lechuga (*Lactuca sativa* var. Crispa) hidropónica en cuatro tratamientos, uno de control o muestra blanca y tres experimentales en los que se emplea un sustrato compuesto por un porcentaje de gravilla y un porcentaje de residuos plásticos de PET molido al 30%, 70% y 100%. El diseño experimental empleado fue por bloques, contando con una réplica y una cubierta de invernadero tipo túnel, empleada como medida de protección de la solución nutritiva frente a factores microclimáticos.

El total poblacional es de cuarenta plantas, repartidas en los cuatro tratamientos (10 plantas por tratamiento) de modo que la muestra fuese representativa para cada uno de estos. Durante el experimento, se llevó a cabo (i) el monitoreo de condiciones microclimáticas (Temperatura, humedad relativa), (ii) la medición de características morfológicas de las plantas en el tallo, hojas y raíz (longitud, diámetro, alto); además del (iii) seguimiento a variables de pH, conductividad y oxígeno disuelto en la solución nutritiva.

Finalizado el experimento, se obtuvieron datos del monitoreo y se calcularon índices (IAF, ICR) para la evaluación del crecimiento de las plantas en los diferentes sustratos. Posterior a esto, se realizó una prueba estadística de varianza (ANOVA) mediante el paquete estadístico para las ciencias sociales (SPSS por sus siglas en inglés), en donde se evidencio una baja significancia entre los resultados de los tratamientos, de forma que estos presentaron alta homogeneidad entre sí. Sin embargo, el tratamiento tres (70% PET-30% gravilla) presentó mejores valores para la curva de fitomasa área (hojas), el tratamiento dos (70% gravilla- 30% PET) para tallos y raíces, y el tratamiento de control presentó un buen rendimiento en todas las variables de crecimiento. De este modo, se determinó viable el uso de PET en sustratos como alternativa de aprovechamiento.

Palabras clave: Sistemas hidropónicos, tereftalato de Polietileno, aprovechamiento de residuos plásticos, alternativas sustentables.

2. Introducción

Los recursos naturales son aquellos componentes de la naturaleza que hacen posible la vida y las actividades humanas. La naturaleza es considerada un ecosistema global que alberga diversos subsistemas desde los cuales se hace el aprovechamiento de sus componentes (Londoño, 2006). La economía es un subsistema abierto al medio ambiente con el que intercambia energía y materia, caracterizado por emplear un modelo de producción; dicho modelo genera unos efectos en el ambiente que repercuten desfavorablemente en el ecosistema global, debido a que sus componentes llegan a ser destinados como materia prima, que una vez extraída inevitablemente será un residuo (Londoño, 2006).

En la actualidad, los residuos sólidos resultantes de actividades económicas han presentado un rumbo no controlado una vez son obtenidos de procesos de producción, pues aunque muchos pueden llegar a tener un segundo uso e incluso un tercero (como el plástico, cartón, papel o el vidrio), es frecuente que estos terminen en un cuerpo hídrico, en el suelo (Acurio, Rossin, Teixeira, & Zepeda, 1997) o con la actual política de tecnologías ambientales de Colombia, en un relleno sanitario (Superservicios, 2016).

Residuos generados como los mencionados anteriormente (plástico, papel, cartón, vidrio), pueden ser destinados a la generación de nuevos productos e incluso, pueden ser implementados en otros sistemas de producción (ANDI, 2015) como es el caso de la hidroponía, dentro la denominada “soilless culture” la cual es un modelo de producción eficiente de alimentos que se originó en el estudio del comportamiento de las plantas y que no requiere del uso del suelo (Gilsanz, 2007).; esta involucra diversos elementos inorgánicos como sustratos, los cuales son empleados en el crecimiento eficiente de las raíces de plantas sobre medios con soluciones nutritivas (Di Lorenzo, Pisciotto, Santamaria, & Scariot, 2013).

Los elementos que pueden integrarse en la hidroponía requieren de características físicas y químicas cumplidas por algunos residuos plásticos, es por tal que la inclusión de estos residuos en sistemas hidropónicos es posible (Pennigsfeld, 1983). En el presente proyecto se implementa la vinculación de residuos plásticos de botellas PET como sustrato, en combinación con materiales inorgánicos a un cultivo hidropónico de hortalizas (lechuga crespa) en la ciudad de Villavicencio, como alternativa de aprovechamiento de dichos residuos.

3. Planteamiento del problema

La economía y la naturaleza se han relacionado de forma dependiente, pues la economía dispone de los recursos de la naturaleza para realizar sus procesos productivos y suplir necesidades como la alimentación. Sin embargo, dichos procesos al finalizar generarán algún residuo que retornará a la naturaleza afectando alguno de sus componentes (Londoño, 2006). La alta demanda mundial de alimentos debido a una creciente población, es uno de los procesos productivos actuales que genera mayor degradación continua de los recursos naturales (FAO, 2015).

Distribuir alimentos a la población ha llevado a la inclusión de nuevos materiales para presentar los alimentos al mercado, entre estos el plástico que por sus características óptimas de sanidad, conservación, calidad y presentación de productos es de uso ideal en la industria alimentaria (Forrest, 2016); su bajo costo ha desencadenado un vertiginoso crecimiento en el proceso de producción en los últimos años, registrando un incremento de 345,9 millones de toneladas producidas para el periodo de 1950 a 2017; superando los registros de casi cualquier otro material y trayendo consigo (como consecuencia) la generación de residuos de la misma naturaleza (PlasticsEurope, 2016).

En la actualidad, se registra también que en su gran mayoría, los productos que emplean plástico en procesos de embalaje, envase y transporte son diseñados para desecharse después de ser utilizado una única vez, lo que ocasiona una rápida acumulación de residuos en unidades de disposición (ONU, 2018); por ende representan mayor preocupación debido a su gran volumen de generación y difícil degradación en el ambiente (ONU, 2018).

Estas dinámicas de producción de residuos plásticos se presentan en diversos países y Colombia no es la excepción, pues se ha registrado que en el periodo de 1997 a 2000, se produjeron en el país entre 220.000 y 280.000 toneladas al año de residuos plásticos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004). Dichas cifras se respaldan en informes del Ministerio de Ambiente y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), indicando que del total de residuos sólidos generados en el país un 14,8% corresponde a plástico (Lopez, 2009). Otras entidades como Greenpeace Andino, estiman que un colombiano promedio llega a generar 1,8 toneladas durante 75 años de vida; cifra que resulta alarmante considerando que en Colombia el 75% de los residuos sólidos del país se dispone en rellenos sanitarios

(Superservicios , 2016) y tan solo el 8% del total de los plásticos desechados son aprovechados (Superservicios, 2017). El país a la fecha no cuenta una política que limite la producción de plásticos de único uso y es poseedor de alrededor de 2.000 empresas de las cuales 100 se encuentran en Bogotá y generan aproximadamente 7.500 toneladas diarias (Téllez, 2012).

Por otra parte, el desaprovechamiento de residuos plásticos se evidencian en gran parte de los departamentos del país, como lo es el Meta, el cual no realiza aprovechamiento ni del cinco por ciento (Superservicios, 2017). En Villavicencio, se generan alrededor de 11.525 toneladas al mes de residuos sólidos, de los cuales el 12,4 % son residuos plásticos; a nivel residencial llega a 15,7% con 25,5 kg de residuos plásticos generados por día (CORPOAMOR, 2015).

La búsqueda de alternativas para el aprovechamiento de dichos residuos, ha identificado a la hidroponía como una gran estrategia debido a su versatilidad en uso de materiales inorgánicos. De esta forma, determinar la influencia que trae consigo la implementación de estos residuos dentro de estos sistemas hidropónicos, requieren de una evaluación detallada que permita conocer sí son o no, una buena alternativa de sustrato. Una especie referente para este tipo de estudio es la lechuga, la cual es una hortaliza que ha sido ampliamente utilizada, para la evaluación de rendimientos debido a su comportamiento en estos sistemas.

Considerando la situación presentada, se plantea entonces el diseño de un sistema de cultivo hidropónico en donde se pueda realizar el aprovechamiento de un plástico altamente generado como el tereftalato de polietileno (PET), de modo que se integran aspectos que involucra tanto la demanda de alimentos como el reciclaje del plástico residual.

Sin embargo, respecto a la influencia que se pudiera generar el plástico como sustrato sobre el cultivo surge la siguiente incógnita: ¿Cuál es la variación del crecimiento de una especie de hortaliza hidropónicas de clima cálido (*Lactuca sativa* var. Crispa) en tres sustratos compuestos por un material inorgánico (gravilla) y de residuos PET en un modelo hidropónico?

A partir de esto se generan dos hipótesis:

- Hi: El uso del plástico PET influye en el crecimiento de las plantas, debido a sus características mecánicas como sustrato.
- Ho: El uso del plástico PET no influya en el crecimiento de las plantas.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar el crecimiento de una especie de hortaliza hidropónica de clima cálido (*Lactuca sativa* var. crispata) sobre tres combinaciones de sustratos inorgánicos, conformados por material inerte y PET molido, a modalidad invernadero en el municipio de Villavicencio, Meta.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un modelo hidropónico vertical con vinculación de residuos plásticos de botellas PET molidas, para hortalizas de lechuga crespata en el municipio de Villavicencio, Meta.
- Desarrollar un cultivo hidropónico sobre tres sustratos compuestos por gravilla y trozos de plástico PET como sustratos (en cuatro proporciones Tc (0%), T1 (100%), T2 (30%), T3 (70%)), bajo monitoreo y control de factores edafoclimáticos.
- Analizar el crecimiento de las plántulas asociando índices de crecimiento (IAF, ICR) y un análisis de varianza (ANOVA) como instrumento de medición y correlación de características fisiológicas.

5. Justificación

La hidroponía es un sistema de cultivo ampliamente empleado en el mundo, sin embargo, las investigaciones realizadas para Latinoamérica y Colombia en particular son limitadas, pues no se cuenta con un número significativo de estudios que aborden sus aplicaciones y son aún más limitados los enfocados al crecimiento de plantas sobre sustratos inorgánicos.

Este modelo o técnica de cultivo se caracteriza por desarrollar plantas en medios sin requerimiento del suelo y posee beneficios en cuanto a reducción de uso de recursos, pues la hidroponía permite (i) ahorrar entre el 10-30% del agua con respecto a cultivos tradicionales, (ii) dar a las plantas mejores condiciones de crecimiento y (iii) reducir el uso de agroquímicos como pesticidas y fertilizantes (Atzori, Nissim, Caparrotta, Santantoni, & Masi, 2018).

De igual forma, permite cultivar diversas hortalizas, frutas, verduras y plantas aromáticas de alta calidad durante todos los periodos del año, debido a su independencia de necesidades nutritivas del suelo y climáticas; representa también, una modalidad de cultivo que permite el ahorro de espacio con una densidad mayor de producción por área sembrada (Di Lorenzo, Pisciotta, Santamaria, & Scariot, 2013)

La hidroponía es también considerada como una ecotecnología destinada a mejorar procesos de desarrollo en áreas rurales, proyectos comunitarios, producción rápida de alimentos de bajo costo y alta calidad, por lo cual permite generar alternativas de emprendimiento a familias de bajos recursos; de igual forma, propone nuevos modelos para solucionar los problemas fitosanitarios relacionados a los cultivos tradicionales (Cajo Curay, 2016). La potencialidad en sus temáticas, ha llevado a que esta sea incluida en programas de cooperación internacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO por sus siglas en inglés), de modo que podría ser incluida en los nuevos objetivos para la humanidad desde el marco del desarrollo sostenible (Cajo Curay, 2016).

El Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnologías e Innovación (Colciencias) que apoya y recopila proyectos de ciencia para Colombia, en el área de hidroponía, no cuenta con un gran número de estudios, especialmente los dirigidos a la evaluación del crecimiento de plantas en sistemas hidropónicos. Este tipo de estudios presentan un gran potencial, ya que

ciertos sistemas de la hidroponía ofrecen la posibilidad de hacer uso de materiales inorgánicos como sustrato y de acuerdo con algunos resultados, se ha evidenciado que el crecimiento y desarrollo de los vegetales aumentan cuando se cultivan en medios inorgánicos en comparación con los orgánicos (Pennigsfeld, 1983).

Al ser recomendada la introducción de materiales inorgánicos en la hidroponía, puede incorporar residuos para ser empleados en sustratos (Di Lorenzo, Pisciotto, Santamaria, & Scariot, 2013). Uno de los residuos inorgánicos de mayor generación y preocupación ambiental, es el plástico proveniente de botellas de tereftalato de polietileno (PET). En este orden de ideas la integración del PET en estos sustratos contribuiría al reúso del material dada la creciente acumulación de estos residuos plásticos, los cuales debido a su baja toxicidad y nulo desprendimiento de sustancias como el Bisfenol A (BPA), logran ser una mejor opción con respecto otros residuos (Universidad Autónoma de Nuevo León , 2015).

Un caso particular de reutilización de estos plásticos se dio en el año 2009, donde Joe Byles presidente de Freedom Garden Products, logró la integración de estos residuos en sustratos hidropónicos y promovió que la empresa Costa Farms, ubicada en Miami, Florida, confirmará sus hipótesis al implementar la nueva tecnología denominada “Aqualok” con aplicaciones para cestas colgantes, plantas en macetas, techos verdes y paisajismo sin excavación.

Considerado lo anterior, es importante realizar estudios previos que permitan evaluar la efectividad de dichos residuos plásticos como sustrato para poder ser aprovechados, mediante el uso de indicadores que determinen su influencia en variables de importancia relacionadas al crecimiento de las plantas; dichos valores de crecimiento son empleados para la estimación de rendimientos productivos (espacio y costo beneficio) en los cultivos hidropónicos.

Es entonces que el uso de estos materiales permite perfilar a la hidroponía como un tipo de agricultura sustentable, como una técnica que favorece el aprovechamiento de residuos plásticos, disminuye el consumo de agua y en tanto las afectaciones en el suelo como las presiones sobre el recurso hídrico.

6. Antecedentes

Como técnica de cultivo, la hidroponía se ha desarrollado a través del tiempo mediante intentos de cultivar plantas sin suelo; desde los Jardines Colgantes de Babilonia, la antigua China, India, Egipto, la cultura Maya, Azteca y tribus asentadas aledañas a lagos sobre los que se cultivaban flores y verduras, debido a las limitaciones de suelo y agua (Beltrano & Giménez, 2015).

A nivel formal, la evidencia de estudios del cultivo hidropónicos tiene sus raíces desde John Woodward en 1699, con el análisis de la absorción de los nutrientes del suelo disueltos en agua (Gilsanz, 2007) y, logra más tarde ser implementado en 1861 por Julius Von Sachs y W. Knop en el registro del crecimiento de las plantas en una solución nutritiva o “nutricultura” (Beltrano & Giménez, 2015); diversas investigaciones fueron realizadas hasta 1929, donde William F. Guericke define el proceso como hidroponía (Durán, 2010).

Durante la segunda guerra mundial en 1939 se presentaron necesidades que abrieron paso a nuevos mercados, la implementación de sistemas hidropónicos fue indispensable para proveer de vegetales y frutas frescas a las tropas en conflicto (Beltrano & Giménez, 2015) y, la necesidad de un material de guerra como un aislante para la conexión de cables de comunicación, causó un incremento en la comercialización del tereftalato de polietileno (Peacock, 2000). Dichos procesos evolucionarían en el tiempo para satisfacer la creciente demanda de alimentos, extendiéndose desde 1950 y consolidándose Japón como líder de exportaciones de sistemas hidropónicos (Durán, 2010).

En cuanto a publicaciones, los primeros registros con relación a la hidroponía datan a principios de los noventa, desde 1993 y 1995 para las bases de datos Scopus y Science Direct respectivamente. Por otro lado, en Colombia, Colciencias registra para hidroponía la primera publicación en 1991. Dichas bases de datos registran la mayor actividad investigativa en Estados Unidos (destacando los Estadounidenses Jay Garland y Richard Strayer), seguido en menor medida por Brasil y España.

Aunque la hidroponía cuenta con un gran número de estudios, las aplicaciones en torno a esta técnica siguen desarrollándose, desde la implementación de sistemas, sustratos y la integración del componente ambiental que introduce novedosos criterios.

En los sistemas hidropónicos en los que se desea por ejemplo, emplear un sustrato se considera el material a emplear como un factor determinante en producción, costos y desde una perspectiva ambiental en durabilidad y la capacidad de ser reciclado (Ortega, Sánchez, Ocampo, Sandoval, Salcido, & Manzo, 2010).

Entre los estudios documentados que referencian el uso de diversos materiales como medios de cultivo se destaca “La calidad y la productividad de los vegetales según la influencia del medio de cultivo: una revisión” (Olle & Siomos, 2012), en el que se presenta un panorama general con relación a la escases de investigaciones que aborden el efecto del medio de cultivo en el crecimiento de las plantas; identifica una tendencia mundial del 88% en el uso de sustratos inorgánicos; registra valores mayores obtenidos en masa y tamaño de las plantas y; estima aportes superiores al 30% con respecto a cultivos en suelo.

Otros estudios como “El impacto del medio de sustrato sobre el rendimiento del tomate y la calidad de la fruta en el cultivo sin suelo” (Suvo, Jewel, Biswas, & Islam, 2016) y “Efectos de siete sustratos en las características cualitativas y cuantitativas de tres cultivares de fresa bajo cultivo sin suelo” (Tehranifar, Arooei, Poostchi, & Nematti, 2007), destacan el fácil manejo de plagas y enfermedades empleando sustratos en hidroponía, las propiedades mecánicas del sustrato y las condiciones que se deben mantener en el cultivo.

En cuanto al panorama latinoamericano sobresale “Los avances de la hidroponía en Latinoamérica” (Rodríguez, 2012), el cual reconoce que no hay un sustrato ideal e introduce materiales inorgánicos usados con éxito en Latino América, los cuales corresponden a cuarzo, arena, grava y ladrillo molido (Guerrero, Revelo, Benavides, Chaves, & Moncayo, 2014).

Colombia por su parte registra una publicación en el tema de estudio, encontrada en el repositorio de Colciencias “Evaluación del crecimiento y calidad de lechuga (*Lactuca Sativa* L) en hidroponía con sistema cerrado de recirculación” (Reyes, Alvarez, Fraile, & Álvarez, 2017), el cual presenta las condiciones ideales del cultivo para lechuga y hace uso de cuatro índices para cuantificar el crecimiento de las plantas en función de sus propiedades morfológicas.

De igual manera en Colombia, desde la superintendencia de industria y comercio se registran tres procesos de diseños de cultivos verticales hidropónicos que buscaban ser patentados, estos corresponden a (i) “Estructura vertical con protección agroclimática de

mecanismos modulares removibles para la siembra y el cultivo de plantas” del año 2012, (ii) “Torrente de cultivo vertical para horticultura y agricultura automática” del año 2018 y (iii) “Unidad colgante vertical doble en forma de bolsas para cultivo hidropónico de plantas en panel de unidades colgantes verticales dobles en forma de bolsas y estructura para invernadero” del año 2015, siendo negada la patente para el último.

Resultados obtenidos en sistemas hidropónicos con sustratos inorgánicos para el cultivo de lechuga de hoja suelta (**Tabla 1**), han demostrado variaciones en variables de crecimiento en hojas, altura y masa de la planta. De igual forma, el rendimiento obtenido para cada sustrato ha presentado valores decisivos al momento de la selección. De esta forma, los estudios de evaluación del crecimiento de las plantas han sido empleados para determinar los elementos que conforman los mejores sustratos para cultivo.

Tabla 1. Resultados para sistemas hidropónicos empleando sustratos inorgánicos

Sustrato	Hojas			Planta		Raíz	Rendimiento (Kg*ha ⁻¹)
	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Nº	Altura (cm)	Masa (gr)	Longitud (cm)	
Arena de río	12,74	11,75	15,1	15,24	150-173,33	-	10,97-23,67
Ladrillo	16,18	15,93	22,43	18,46	515,17	-	21,20
Lana mineral de roca	13,8	12,5	7,8	-	-	38,6	-

Nota. Descripción de las variaciones en variables de crecimiento en hojas, altura y masa de la planta Adaptado de: (Salguero, 2015), (Arcos, Benavides, & Rodríguez, 2010), (Kim, y otros, 2019)

7. Marco de referencia

7.1. Marco teórico

La hidroponía se deriva del griego “*Hidro*” (agua) y “*Ponos*” (trabajo o labor), lo cual significa “trabajo en agua” (Durán , 2010). Esta hace parte de los sistemas de producción denominados Cultivos Sin Suelo (CSS) y se caracteriza por generar medios de crecimiento artificiales y controlados para las plantas cultivadas, los cuales están constituidos por sustancias de diverso origen, ya sea orgánico o inorgánico (Gilsanz, 2007).

La investigación del término ha permitido transformarla en una modalidad para el manejo de plantas, que permite cultivos principalmente de tipo herbáceo, aprovechando sitios o áreas no convencionales (Beltrano & Giménez, 2015). Es también un modelo productivo alternativo de producción de plantas en climas extremos sin considerar en gran medida, características del suelo o climáticas dadas sus modalidades de cultivo bajo invernadero (Di Lorenzo, Pisciotta, Santamaria, & Scariot, 2013). Dicha modalidad ha sido tan eficiente que diferentes países del norte de Europa, lo han utilizado para cultivar hortalizas de consumo en fresco y de alta calidad (Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 1996).

Aun cuando no se considera la hidroponía como un sistema de producción convencional (debido a cultivo sin suelo, sistemas para la adaptación de cultivos y una mayor producción por espacio ocupado), se vislumbra como una de las soluciones a la creciente disminución de las zonas agrícolas, producto de la contaminación, la desertización, el cambio climático y el crecimiento desproporcionado de las ciudades.

Aunque la hidroponía es considerada una buena alternativa de producción que responde a las necesidades de zonas agrícolas, ha presentado una idea errónea por parte de ciertos grupos ambientalistas, debido a que sus prácticas no entran en el modelo de producción orgánica tradicional, sin embargo, cumple el mismo proceso que un cultivo en suelo, en donde las plantas deben extraer nutrientes del medio (los elementos nutrientes disponibles en el suelo se suplen a través de soluciones nutritivas hidropónicas) (Durán , 2010).

Los sistemas hidropónicos emplean diversas metodologías y diseños de cultivo para transportar y brindar constantemente los nutrientes necesarios a las plantas, desde la implementación de sustratos, transporte de soluciones y aplicación de técnicas que generan diferentes clasificaciones.

Una de las clasificaciones más comunes divide en dos los sistemas hidropónicos de acuerdo al soporte brindado a la planta, estos son (i) sistemas en medio líquido, que no tienen otros medios para apoyar las raíces y (ii) sistemas en medio sólido, utilizando un sustrato para soportar las raíces de las plantas (Lorenzo et al., 2013). Si bien, no existe el sustrato ideal, cada uno presenta una serie de ventajas e inconvenientes y su elección dependerá de las características del cultivo a implantar, las variables ambientales y de instalación (Arcos, Benavldes, & Rodriguez, Evaluation of two sustratos and two dose of fertilization under conditions hidroponics low hothouse in lettuce, 2011).

Además de estas dos clasificaciones, los cultivos que emplean sustrato también son categorizados por sus propiedades u origen. De acuerdo a sus propiedades en: (i) químicamente inertes (grava, roca volcánica, perlita, lana de roca, arcilla expandida, etc.) o (ii) químicamente activos (turberas, orujos, residuos de la industria maderera, vermiculita, etc.). La diferencia entre estos radica principalmente en la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

A su vez, los cultivos de sustrato pueden ser clasificados en dos categorías de acuerdo al sistema que maneje la solución nutritiva: sistemas abiertos (cuando la solución nutritiva que drena de las raíces no se reutiliza); y sistemas cerrados (cuando la solución de nutrientes excedente se recolecta, se corrige y se vuelve a recircular) (Lorenzo et al., 2013).

De acuerdo al origen del sustrato, se pueden manejar los orgánicos o los minerales. Los sustratos orgánicos a su vez pueden ser naturales, que por lo general necesitan de un proceso de compostaje para ser aptos para el cultivo; o sintéticos que son polímeros de la industria de los plásticos (poliuretano, poliácridamida y poliestireno) (Roca & Martínez, 2011).

Los sustratos minerales por su parte pueden ser naturales, procedentes de rocas y minerales diversos (arenas, gravas, gravas volcánicas, etc.) o pueden ser tratados, procedentes de

la industria con propiedades muy alteradas (perlita, lana de roca, vermiculita, arcilla expandida, escorias industriales de altos hornos, estériles del carbón, etc.) (Roca & Martínez, 2011).

Con respecto a las técnicas empleadas para hidropónicos, se destaca la técnica de cultivo con flujo laminar de nutrientes, conocida como NFT (por sus siglas en inglés Nutrient Film Technique) desarrollada en Inglaterra por el Dr. Allan Cooper en los años 1970; en ésta la solución nutritiva puede circular de forma continua o intermitente, por lo que el oxígeno es aportado por la solución y el aire que rodea a gran parte de las raíces (Brenes & Jiménez, 2014).

La técnica NFT se caracteriza por no emplear ningún sustrato, sino por el contrario, cultivar directamente en agua con sales minerales disueltas, por lo que ofrece una mayor eficiencia en la utilización de los elementos minerales esenciales para el crecimiento de las plantas, de agua y oxígeno (Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 1996).

7.2. Marco conceptual

El abordaje conceptual considera la caracterización general y los elementos principales con relación a la clasificación de los plásticos, la hidroponía y los sustratos. De igual forma, se presentan los índices implementados para la estimación del crecimiento para plantas.

7.2.1. Tereftalato de polietileno

El plástico PET o por sus siglas en inglés Polyethylene terephthalate, corresponde a un polímero termoplástico ampliamente usado en las industrias, ideal para la distribución de productos y usado en su mayoría para botellas de bebida (Peacock, 2000).

Tabla 2. Generalidades del plástico PET

Simbología	Características	Propiedades	Aplicaciones
	-Claro -Lavable -No absorbe la humedad	-Resistente a grasa -Resistente al calor. -Impermeable.	-Botellas plásticas -Envases transparentes. -Recipientes de aderezo -Medicinas -Agroquímicos

Nota. Cualidades y características del plástico PET y sus aplicaciones. Adaptado de: (Forrest, 2016) y (Peacock, 2000).

Este a diferencia de otros grupos dentro de la clasificación de plásticos, no presenta una alta toxicidad ni desprende sustancias al ambiente bajo condiciones de temperatura ambiental (a excepción de temperaturas elevadas cercanas al punto de ebullición del agua). Es por tal que representa un potencial sustrato a implementar, de fácil adquisición y reciclaje en hidroponía bajo condiciones de control adecuadas (Gandarillas , 2015).

7.2.2. *Elementos de la hidroponía*

La hidroponía cuenta con elementos únicos que caracterizan el tipo de sistema implementado debido a su diseño particular .Sin embargo, todo sistema hidropónico debe considerar factores que determinan la efectividad del cultivo, estos factores corresponden a la utilización de sustratos, la preparación de las soluciones y las condiciones del cultivo.

Los sustratos son la proporción de materiales sólidos que sirven de soporte y aireación a las raíces de las plantas en un cultivo hidropónico; su clasificación común los divide en sustratos orgánicos e inorgánicos (Fernando, 2012). En la actualidad, los sustratos orgánicos más usados son la cascarilla de arroz, el aserrín y la fibra de coco; así mismo los sustratos inorgánicos más usados corresponden a la arena de río, piedra pómez y la escoria de carbón (Fernando, 2012).

Tabla 3. *Requerimientos funcionales de los sustratos*

Factor	Requerimientos
Físico	Ser Livianos
	Retención de humedad
	Permitir la aireación
	De difícil degradación
Químico	No debe absorber ni suministrar ningún elemento nutritivo
Biológico	Libre de plagas y enfermedades

Nota. Descripción de grupos de sustratos. Adaptado de: (Durán , 2010) y (Gilsanz, 2007).

Entre los grupos de sustratos citados, los más indicados para el cultivo hidropónico son aquellos que no tienen actividad química o la tienen muy reducida. Estos materiales sirven de soporte al cultivo, proporcionan al sistema cierta capacidad de amortiguación de la disponibilidad de agua y nutrientes, inferior a la de los materiales orgánicos, pero superior a la de

los sistemas líquidos y también aumentan la inercia térmica del ambiente radicular (Roca & Martínez, 2011).

Las soluciones son el medio acuoso que contiene los nutrientes requeridos por las especies cultivadas que normalmente son extraídos del suelo por las plantas (Gilsanz, 2007); consisten en una mezcla homogénea entre los nutrientes por aplicar en un volumen determinado de agua, la cual se debe proveer al cultivo en sus procesos de desarrollo y cultivo (Durán , 2010).

Tabla 4. *Requerimientos de las soluciones.*

Elemento		Requerimiento
Agua		pH neutro
		Bajos niveles de sales minerales
Nutrientes	Macronutrientes	C, H, O, N, P, K, Ca, S, Mg
	Micronutrientes	Fe, Mn, Br, Zn, Cu, Mo, Co, Cl

Nota. Propiedades y nutrientes. Adoptado de: (Durán , 2010) y (Gilsanz, 2007).

Las condiciones del cultivo óptimas se relacionan directamente con el oxígeno disponible para las plantas, la humedad y la temperatura ambiental o de invernadero a las que estas se encuentran expuestas. En un sistema hidropónico en recipientes, estos deben poseer un 70% libre del total de volumen que permita una aireación mediante los poros abiertos del sustrato y, a su vez permita un buen drenaje (Durán , 2010).

7.2.3. Desarrollo e índices de crecimiento

En hidroponía y los cultivos tradicionales, los conceptos de desarrollo y crecimiento son clave en estudios de efectividad en sistemas de producción. El crecimiento se define como aquel aumento irreversible de volumen de una célula, tejido, órgano o individuo, generalmente acompañado de un aumento general en la masa (Universidad Nacional entre Ríos UNER, 2004). Mientras el crecimiento es considerado como un aspecto cuantitativo, el desarrollo es un término que considera aspectos cualitativos de las plantas (Universidad Nacional entre Ríos UNER, 2004).

Para la estimación del desarrollo de las plantas en ciclos de cosecha son implementados índices que permiten cuantificar el cambio irreversible producido por el crecimiento en

dimensiones como la longitud. Algunos índices aplicados para cultivos hidropónicos corresponden a tasas relativas de crecimiento y asimilación (Reyes, Alvarez, Fraile, & Álvarez, 2017). Estos son presentados a continuación:

Tabla 5. *Índices de crecimiento para plantas.*

Índice	Ecuación	Unidades
Índice de área foliar (IAF)	L_A/P	Adimensional
Índice de crecimiento relativo (ICR)	M_f-M_i/T	cm/día

Nota. Descripción de índices. Tomado de: (Reyes, Alvarez, Fraile, & Álvarez, 2017)

Dónde:

M_f	Medición final (cm)	P	Área del suelo (cm ²)
M_i	Medición inicial (cm)	T	Tiempo (días)
L_A	Área foliar (cm ²)		

El índice de área foliar muestra la capacidad fotosintética del cultivo y, además establece la relación (que ocupa a través del tiempo) existente entre el área foliar y la superficie del terreno (Hernandez, Casas, & Galvis, 1995). Por otro lado, el índice relativo de crecimiento permite obtener la relación resultante de determinar un diferencial de crecimiento por unidad de tiempo.

En estudios de plantas, cualquier variable es válida para expresar la tasa de crecimiento, ya sea desde un órgano, un individuo o una determinada población. Esta tasa se puede expresar de diversas formas, ya sea por el aumento de volumen, de peso húmedo o de peso fresco, o variaciones de longitud o diámetro (Universidad Nacional entre Ríos UNER, 2004).

Las curvas de crecimiento corresponden a una medida de la variación expresada por unidad de tiempo, por lo que indican la velocidad de crecimiento. Estas curvas son normalmente denominadas como curva SIGMOIDE, la cual se caracteriza por presentar en primer lugar una (i) fase inicial que produce un crecimiento en forma exponencial, seguida de (ii) una fase rectilínea o lineal que presenta tanto periodos de tiempo como aumentos de crecimiento iguales, y finalmente (iii) la fase de envejecimiento o senescencia, en la que el crecimiento es lento o desacelerado (Universidad Nacional entre Ríos UNER, 2004).

7.2.4. *Ecología, características y propiedades de la lechuga.*

La lechuga pertenece a la familia *Asteraceae*; se caracteriza por presentar raíces laterales que extraen tanto nutrientes como agua en niveles superiores del suelo y la gran diversidad en tipos de hojas y hábitos de crecimiento (INIA, 2017); por ello se han clasificado normalmente en tres tipos (i) las lechugas de cabeza, (ii) las de hoja suelta y (iii) las tipos cos (Camacho, 2015).

Los climas caracterizados por ser frescos, húmedos, con baja ocurrencia de vientos, tener una temperatura promedio entre 15 a 20 °C, una altura entre los 1.800 a 2.800 m.s.n.m, un luminosidad solar de 12 horas por día y humedades relativas entre 60 y 70%, favorecen el crecimiento del cultivo de lechuga y su productividad (Nucleo Ambiental S. A. S., 2015).

El ciclo productivo de la lechuga variedad verónica se cosecha a los 56 días después de trasplante. Tiene una altura promedio de 20,3 cm, un peso promedio de 480 g y posee alta resistencia a florecimiento precoz (Noreña, Aguilar, Espitia Malagón, Tamayo Molano, Argüello, & Arroyave, 2014). El cultivo cuenta con cinco fases, estas corresponden a la de plántula (emergencia de cotiledones), roseta (aparición de nuevas hojas), formación (aumento en el ancho y largo de hojas), madurez (formación de un cogollo firme con gran número de hojas) y floración (generación de semilla) (Camacho, 2015).

7.3.Marco Legal

La técnica de hidroponía, sistemas y cultivos hidropónicos a la fecha no cuentan para Colombia con una normatividad vigente establecida, en la que se indique y reglamente su manejo, parámetros o relacionados al área. Considerado lo anterior, se presenta a continuación normatividad relacionada al área indirectamente (debido a la ausencia de reglamentos específicos) por ejemplo, compromisos adquiridos en planes de desarrollo gubernamentales, en el decreto reglamentario al sector ambiente y políticas nacionales de desarrollo sostenible.

Con relación a residuos plásticos, estos están contenidos dentro de los residuos sólidos, por lo que se consideran las normas generales de manejo integral de residuos sólidos, específicamente las relacionadas a gestión, utilización y aprovechamiento. Sin embargo, actualmente se está adelantando un Plan Nacional para la gestión sostenible de los plásticos de un solo uso, el cual contempla medidas, correcciones y prohibiciones.

Tabla 6. *Marco Legal con relación al sector ambiente.*

Norma	Descripción
Constitución política de Colombia de 1991	<i>Artículo 79.</i> Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. <i>Artículo 80.</i> El estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. <i>Artículo 366.</i> El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del estado.
Ley 99 de 1993	Creación del Ministerio de Ambiente, reordenación del sector público en gestión y conservación de los recursos naturales, organización del Sistema Nacional Ambiental SINA.
Ley 1753 de 2015	Plan Nacional de desarrollo 2014-2018.
Decreto ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Título III: De los residuos, basuras, desechos y desperdicios Artículos 34 a 38.
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. “Por medio del cual se expide el Decreto Único, el presidente de la república de Colombia en ejercicio de las facultades que le confiere el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución Política.
Resolución 1045 de 2003	Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones.
Resolución 1407 de 2018	Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones
Política Nacional de desarrollo sostenible	Sobre producción y consumo sostenible

Nota. Descripción de la normatividad colombiana para el sector. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

8. Metodología

8.1. Ubicación de la zona de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la localidad de la Cuncia, aledaña al municipio de Villavicencio, en el departamento del Meta. Cuenta con coordenadas 4°03'07.41'' Norte, 73°44'36.93'' Oeste y una altitud media de 525 msnm.

8.2. Caracterización de la zona de estudio

Las características climatológicas de pluviosidad, temperatura y humedad para el municipio de Villavicencio según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales son (IDEAM, 2010).

- Pluviosidad media anual de 4383 mm
- Temperatura promedio de 25,5 °C
- Rango de temperatura máxima entre 28-32°C
- Rango de temperatura mínima entre 20-22°C
- Rango de humedad relativa entre 67-83%

8.3. Tipo de metodología implementada

El presente estudio emplea una metodología de tipo cuantitativa y experimental, caracterizada por la planeación, ejecución, monitoreo y control de un experimento llevado a cabo en un montaje (diseñado y adecuado de acuerdo a las necesidades de la zona de estudio), para la obtención continua de datos de crecimiento en plantas hidropónicas durante un periodo de tiempo aproximado de cuatro meses (comprendidos de los meses de septiembre a diciembre).

Asimismo, se distribuyen los tratamientos experimentales mediante bloques y se agrupan los procesos a realizar en tres grandes fases con relación a los objetivos específicos. Dichas fases corresponden a planeación, ejecución y valoración para la evaluación del efecto del sustrato en el crecimiento de hortalizas de Lechugas (*Lactuca sativa* var. Crispa, denominadas de ahora en adelante especie A).

8.4. Fase de planeación

8.4.1. Estructuración del diseño del sistema

El diseño del sistema hidropónico se realizó como una estructura prismática triangular o en forma de “A”, con soportes horizontales de cuatro niveles siguiendo modelos propuestos para cultivos hidropónicos verticales. Como medida de control y protección del cultivo hidropónico, se realizó previamente el diseño del invernadero que cubriría la estructura, siguiendo el modelo tipo túnel y adicionalmente, la implementación de malla negra en la parte superior (un metro arriba con respecto a la altura del invernadero) para la generación de sombra ligera debido a altas temperaturas de la zona de estudio.

Con respecto al sistema de recirculación de la solución nutritiva, se seleccionó el empleado por la técnica NFT, en el que se implementaron tubos de policloruro de vinilo (PVC) interconectados para llevar la solución a las plantas, la cual es impulsada mediante una bomba sumergible y cae por gravedad a los diferentes niveles de la estructura. En cuanto al tanque de almacenamiento que recolecta la solución nutritiva, el 80% de su volumen se ubicó debajo del suelo (como medida de enfriamiento) y adyacente a la estructura hidropónica cubierta por el invernadero.

En cada nivel se realizaron orificios para (i) el crecimiento individual de cada planta con una separación entre orificios (recomendada en ocho pulgadas), (ii) la circulación de la solución en cada extremo de los tubos de PVC y (iii) el drenaje de la solución acuosa por gravedad al tanque de almacenamiento. Adicional a lo anterior, se implementaron mallas en los orificios de los extremos de cada nivel (con diámetro inferior a tres milímetros) a modalidad de filtros con el fin de impedir el paso del sustrato a otros niveles.

Por otro lado, se consideraron pendientes inferiores al tres por ciento (<3%) recomendadas para los extremos de los tubos sujetos a la estructura debido a la velocidad y distribución que alcanza la solución. Con respecto al soporte de la raíz, el diseño integra el uso de sustratos inorgánicos al interior de los tubos de circulación de la solución, de modo que se obtuvo un sistema híbrido entre las técnicas que emplean sustrato en recipientes y la NFT de raíz flotante.

8.4.2. Distribución de los tratamientos experimentales

Los tratamientos se componen de sustratos inorgánicos conformados cada uno por materiales inertes, con capacidad de oxigenación radicular y sin aporte químico alguno a la solución del medio de cultivo, los cuales corresponden a gravilla fina y residuos plásticos de PET molido. Se emplearon cuatro tratamientos, tres experimentales compuestos por un porcentaje de gravilla y un porcentaje de PET (al 30%, 70% y 100% del volumen total del sustrato); y un tratamiento de control en el cual no se emplea ningún sustrato, denominado “muestra blanca”.

El montaje se compone de un lado de tres bloques con sustrato y un bloque en muestra blanca, contando con una réplica para cada bloque en la parte posterior del montaje, es decir dos bloques con un mismo tratamiento y cinco plántulas por cada bloque, para un total de 10 plantas por tratamiento y 40 en total. A continuación se presenta su distribución gráfica

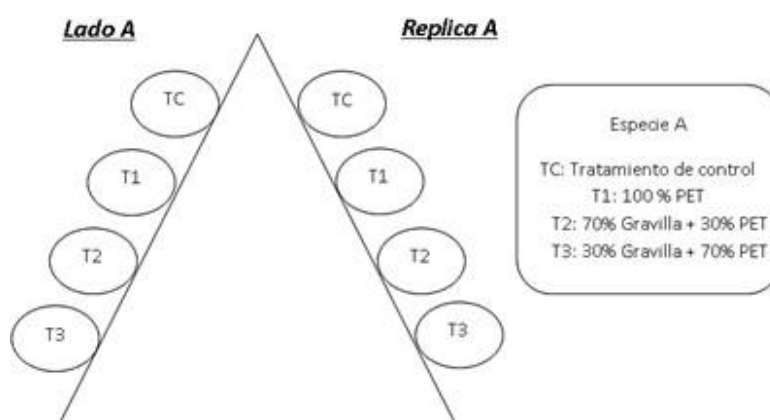


Figura 1. Distribución de los tratamientos experimentales en el montaje, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

8.4.3. Distribución de los sustratos en el montaje

El porcentaje del volumen del sustrato con respecto al tubo se seleccionó en 40%, dejando libre el 60% del tubo con fines de aireación y espacio para el desarrollo individual de las plantas. La igualdad que relaciona el volumen de un tubo con forma cilíndrica se indica a continuación.

$$\text{Volumen de un cilindro} = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * h$$

Ecuación 1. Volumen para tubos de crecimiento.

Partiendo de dicho volumen, se estima el volumen necesario de cada material multiplicando el valor obtenido por el porcentaje, para formar los tratamientos experimentales que requieren la mezcla de dos materiales

8.4.4. *Rótulos y numeración de las plantas*

La rotulación de las plantas se realizó en letra y número, de modo que la denominación “A” indica el lado A del montaje y la denominación “B” indica el lado correspondiente a la réplica. Por otro lado el número siguiente a la letra representa al tratamiento al que pertenece la planta, de modo que el número uno corresponde al tratamiento de control o muestra blanca, el número dos al tratamiento experimental uno, el número tres al tratamiento experimental dos y el número cuatro al tratamiento experimental tres. Dicha rotulación se escribió en cinta de enmascarar y se ubicó al frente de cada planta para la identificación de cada individuo; a continuación se presenta su distribución gráfica.

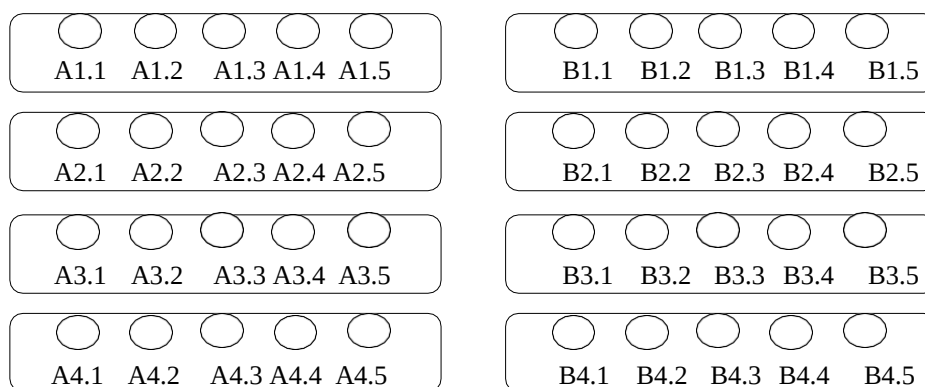


Figura 2. Rotulación de plantas en el montaje, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

8.5. Fase de ejecución

8.5.1. *Obtención de las plántulas*

Debido a las condiciones ambientales poco favorables e intentos fallidos para la germinación inicial de las semillas, se optó por adquirir las plántulas en una zona aledaña a la ciudad de Bogotá específicamente en el municipio de Cota, Cundinamarca; de modo que fueron transportadas en vehículo particular hasta la zona de estudio.

Las plántulas se sembraron en suelo y contaban con veinte (20) días de germinadas al momento de la entrega; por lo cual fue necesario un lavado previo en el intersección de la raíz y el tallo con agua a temperatura ambiente. De igual forma, fue necesario un periodo de transición de cinco días en las que se dejaron en agua sumergiendo las raíces, dejando libre tallo y hojas.

8.5.2. Obtención de sustratos

Las botellas de PET implementas corresponden a las presentaciones de 250 y 500 ml las cuales fueron molidas y almacenadas por una Estación de Clasificación y Aprovechamiento (ECA) en la ciudad de Bogotá, en la localidad de Vitelma (Carrera 8 bis #41 sur); se optó por dicha medida debido a que en el municipio de Villavicencio hasta la fecha, no cuenta con una ECA que realice el proceso de molienda del PET, por lo cual fue trasladado desde Bogotá para poder ser usado en el montaje. El PET fue adquirido por bulto, contando con 40 kg y con un diámetro de grano de tres milímetros.

Por otro lado, la gravilla se obtuvo en la zona de estudio (de modo que fue de fácil adquisición y no fue necesario un transporte), fue recolectada y lavada manualmente; posteriormente tamizada con malla, dejando pasar gránulos con diámetro inferior a los nueve milímetros (<9mm). Al finalizar el proceso de tamizaje de la gravilla se realizó un segundo lavado al material seleccionado como medida de prevención.

8.5.3. Adecuación y desinfección de sustratos

Los sustratos se depositaron por separado en dos recipientes; estos fueron lavados en primer lugar con agua de grifo a temperatura ambiente y posteriormente con agua a 98 °C, dejando sumergido el material por un periodo de 20 minutos y posteriormente retirada del agua.

Una vez lavados los sustratos, se agregó una disolución de hipoclorito de sodio (NaClO) concentrado al 13% como medida de desinfección durante 24 horas; se consideró cuatro litros de hipoclorito de sodio y se halló la cantidad de agua al agregar de modo que la concentración de la nueva solución fuese 5%, correspondiente a la dosis recomendada de desinfección del proveedor. Finalmente se retiró el desinfectante y se dejó un periodo de reposo de dos días antes de ser incorporado al sistema hidropónico.

Tabla 7. *Desinfección de sustratos.*

Soluto: Hipoclorito de sodio (NaClO)				Solvente: Agua		Solución: Desinfectante	
Volumen (Litros)	C%	Compuesto		Volumen (Litros)	C%	Volumen (Litros)	Concentración % deseada
		NaClO (Litros)	H ₂ O (Litros)				
4	13%	0,52	3,48	X	0%	4 + X	5%

NOTA: Donde X es la cantidad de agua a agregar, *Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.*

Aplicando la ecuación para mezclas homogéneas en disoluciones, se obtuvo el volumen de agua a agregar en litros para obtener la concentración deseada.

$$\text{Agua a agregar} = \frac{\% \text{Volumen de NaClO}}{\text{Concentración deseada}} - \text{Volumen del soluto}$$

Ecuación 2. Disolución del desinfectante NaClO.

8.5.4. *Adquisición de equipos*

Las características específicas de los equipos empleados se presentan a continuación.

Tabla 8. *Caracterización de equipos.*

Equipo	Modelo	Características
Bomba sumergible	HJ-1541	Altura máxima alcanzada: 2 metros Voltaje: 110 V/ 60 Hz Caudal: 1400 L/h Fuerza: 28 W
Termohigrómetro	UNI-T A12T	Temperatura (°C o °F): Máxima, media y mínima Humedad relativa Tiempo de muestreo, hora y alarma
Multiparámetro	Multiline 3630 WTW	Conductividad eléctrica O ₂ disuelto y pH

NOTA: *Equipos necesarios, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.*

Los equipos correspondientes a la bomba sumergible y termohigrómetro se adquirieron mediante compra realizada directamente por los autores. Por otro lado, el multiparámetro fue adquirido por la Universidad Santo Tomas Villavicencio desde la dirección de laboratorios y se utilizó durante los tres primeros días de cada semana para el periodo de monitoreo.

8.5.5. Limpieza del montaje

Realizado el montaje, se hizo uso de la bomba sumergible para impulsar agua de grifo a temperatura ambiente por los tubos del sistema desde el tanque de almacenamiento, dejando rebosar el agua por los agujeros destinados al crecimiento de las plantas; esto con el fin de realizar un lavado de los tubos previo a la incorporación de sustratos, la solución nutritiva y al trasplante de las plántulas.

8.5.6. Preparación de la solución nutritiva

La solución inicial se preparó considerando los requerimientos nutricionales de las plantas y realizando la disolución de un fertilizante en un volumen de agua conocido; los tres parámetros de mayor importancia que debe cumplir la solución nutritiva corresponden a partes por millón (ppm), conductividad eléctrica y pH.

Tabla 9. *Parámetros de la solución nutritiva.*

Parámetro	Etapas de la planta	Registro
pH (Hidroxilos)	Todas	5,5-6,5
Ppm (Partes por millón)	Germinación	800
	Crecimiento	1200-1500
	Maduración	1500-1800
Conductividad (ms/cm =ds/m)	Todas	1,5-3
Oxígeno disuelto (O ₂) (mg/ml)	Todas	3-4
Temperatura ideal (°C)	Todas	15°-25°

Nota. *Intervalos para la solución nutritiva*, Adaptado de: (Reyes, Alvarez, Fraile, & Álvarez, 2017) y (Cajo Curay, 2016).

El fertilizante empleado corresponde a una formula en polvo para disolución “Microrriego”, distribuido por Microfertisa S.A en su presentación de un kilogramo (1 Kg). La composición garantizada del fertilizante especificada en su empaque se presenta a continuación.

Tabla 10. *Composición garantizada del fertilizante.*

Compuesto		Composición (%)	Compuesto		Composición (%)
Nitrógeno total	(N)	10,0	Cobre	(Cu)	0,03
Nitrógeno nítrico	(N)	9,7	Hierro	(Fe)	0,3
Nitrógeno amoniacal	(N)	0,3	Manganeso	(Mn)	0,3
Fósforo asimilable	(P ₂ O ₅)	3,0	Molibdeno	(Mo)	0,005
Potasio soluble en agua	(K ₂ O)	40,0	Zinc	(Zn)	0,3
Magnesio	(MgO)	1,0	EDTA y ácido cítrico (Ph)		3,71
Azufre	(S)	1,0	Solubilidad en agua a 20°		15 g /100 ml
Boro	(B)	0,2	Conductividad eléctrica		8,71 ds/m
			(10g/L)		

NOTA: Descripción de la composición garantizada del fertilizante por empaque, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Para obtener la relación entre la masa del fertilizante a agregar y la cantidad de agua a emplear, se considera el requerimiento de ppm que debe tener la solución nutritiva en las etapas de crecimiento y maduración. La expresión que relaciona la masa del soluto a agregar con las partes por millón se presenta a continuación.

$$ppm = \frac{mg \text{ Solute}}{Kg \text{ Solución}}$$

Considerando que la masa de la solución es igual a la sumatoria de la masa del soluto y el solvente se obtiene:

$$ppm = \frac{mg \text{ Solute}}{Kg \text{ Solute} + Kg \text{ Solvente}}$$

Ecuación 3. Igualdad de Partes por millón expresada en función de masa

Debido a que el solvente corresponde al agua y esta se expresa en términos de masa en la ecuación anterior, se empleó la densidad del agua a 27°C (temperatura ambiente) para obtener la masa teniendo un volumen conocido.

$$Masa (Kg) = Densidad \left(\frac{Kg}{m^3} \right) * Volumen (m^3)$$

Ecuación 4. Obtención de la masa del solvente

8.5.7. Trasplante de plántulas

Terminado el periodo de transición de cinco días en el que las plantas se dejaron en agua (como periodo de adaptación al ambiente hidropónico), la limpieza del montaje, la preparación y la circulación de la solución nutritiva, se realizó el trasplante de las plántulas al montaje.

Para el trasplante se dispuso de vasos desechables de siete onzas (uno para cada planta), haciendo un orificio en la parte inferior del vaso, de modo que este no deje pasar la raíz de la planta, esto con el fin de brindar un soporte inicial para el tallo. Las plántulas son lavadas cuidadosamente e insertadas en los vasos; posterior a esto se inserta el vaso con la plántula dentro de los orificios del montaje dejando que la raíz cuelgue y toque la solución nutritiva.

8.5.8. Monitoreos

8.5.8.1. Registro y control de condiciones microclimáticas

El monitoreo de las condiciones microclimáticas se realizó desde la cubierta y protección del invernadero, es decir que las mediciones tomadas corresponden específicamente al ambiente al que se encontraron expuestas las plantas. Esta medida, se realizó tanto para realizar el control de las condiciones de las plantas como las de solución nutritiva, debido a que la alteración en las propiedades fisicoquímicas de la solución por factores externos como lluvia, animales o material orgánico, podría incurrir en el aumento o disminución de niveles de agua, concentraciones o aportes químicos perjudiciales.

Dicho control se llevó acabo diariamente mediante el registro de la temperatura (máxima, mínima y media) y la humedad relativa dada por el termohigrómetro, tomando la lectura del equipo de dos a tres veces por día, tanto en horas de la mañana como en horas de la tarde. Registrado los valores diarios, en los casos en que la temperatura superó los 29°C se realizó de uno a tres riegos, dejando caer agua en forma de lluvia mediante una manguera en la parte superior o techo del invernadero, esto con el fin de disminuir la temperatura al interior de este.

8.5.8.2. Registro de concentración de la solución nutritiva

Con respecto a la solución nutritiva, se empleó el multiparámetro para la medición de variables de pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Las mediciones se realizaron los tres primeros días de cada semana hasta el día de la cosecha, de acuerdo a la disponibilidad del equipo en laboratorio y la información se recopiló en un formato especificando la planta, las unidades de medidas dadas por el equipo y la fecha en que se realizó la medición.

8.5.8.3. Corrección de la solución nutritiva

Conforme las plantas se desarrollan los nutrientes de la solución nutritiva disminuyen, es por tal que se realizó el registro de la concentración de la solución y en base a dichos datos se determinaba cómo debía corregirse.

Este proceso se realizó en dos casos, el primero cuando el nivel de agua disminuía (normalmente por las altas temperaturas presentadas) y se aumentaba la concentración de la solución, en dicho caso se agregaba un volumen de agua conocido para compensar el nivel del agua perdido; el segundo caso corresponde al bajo nivel de nutrientes debido a la absorción de las plantas, donde es necesario preparar una dosis concentrada para corregir la solución del tanque de almacenamiento. La expresión que relaciona la concentración y el volumen de agua se presenta a continuación.

$$C3 * V3 = (C1 * V1) + (C2 * V2)$$

Ecuación 5. Concentración para soluciones con mezcla homogénea

Considerando que

$$V3 = V1 + V2$$

Debido a que se tiene estandarizado la concentración deseada (2,1 ms/cm) para la solución y se conocen los volúmenes tanto del tanque como el agregar se determina la concentración dos, la cual corresponde a la que se debe agregar para llegar a la concentración de la solución deseada.

$$C2 = \frac{(C3 * (V1 + V2)) - (C1 * V1)}{V2}$$

Ecuación 6. Concentración aplicada para corrección de la solución nutritiva

Una vez determinada la concentración se emplea la **Ecuación 3** iterando la expresión para obtener la masa en miligramos del soluto a agregar. No obstante, debido a que el equipo (multiparámetro) registra la concentración en conductividad eléctrica y la expresión está dada en partes por millón, se toma como referente la equivalencia norteamericana que expresa 1 ms/cm como 500 ppm; siguiendo esta equivalencia se realizó la conversión de unidades.

8.5.8.4. Registro de crecimiento de las plantas

El registro del crecimiento de las plantas se realizó mediante la medición de características dimensionales (longitud, área, diámetro) de tallos y hojas presentados en las plantas; esto fue llevado a cabo en tres oportunidades en días con temperaturas entre los 26°C de modo que las plantas no sufrieran maltrato significativo.

La información se recopiló en un formato especificando la planta, las medidas en centímetros para las variables de estudio y la fecha en que se realizaron las mediciones. Obtenidos los valores a través del tiempo se generó un historio de crecimiento, el cual recopiló la información en un libro de Excel que posteriormente se analizó en la fase de valoración.

8.5.8.5. Control de plagas y especies invasoras

Durante el periodo de desarrollo de las plántulas se presentó el crecimiento de plantas cerca al montaje, de modo que fueron retiradas manualmente para evitar alguna enfermedad y posibles especies invasoras. Por otro lado, no se realizó la aplicación de ningún tipo de plaguicida, fungicida o herbicida debido a la protección del invernadero y la zona natural adyacente.

8.6. Fase de valoración

8.6.1. Recolección de datos finales

Terminado el periodo de crecimiento de las plantas se procedió con la cuantificación y recolección final de los datos finales obtenidos del monitoreo. En primer lugar, se retiraron las

plantas de cada nivel (por orden descendente de los tratamientos) con especial precaución en las raíces dada la fragilidad de estas; una vez retiradas del montaje, se realizó el conteo de hojas, la toma de medidas de longitud y diámetro externo para el tallo, alto y ancho de las hojas, una breve descripción de la planta en general y la longitud de la raíz.

La información se recopiló en un formato especificando la planta, el tratamiento, las medidas en centímetros para cada variable, las observaciones generales y un registro fotográfico de cada individuo.

8.6.2. Tratamiento estadístico inicial

Una vez se obtuvieron los datos de monitoreo del invernadero y el histórico que contiene el registro de crecimiento de las plantas, se realizaron dos tratamientos estadísticos iniciales, los cuales corresponden al cálculo de medidas de tendencia central (media, mediana, moda) y medidas de posición (máximos y mínimos).

Para los datos de monitoreo correspondientes a humedad relativa y temperaturas, se obtuvo tanto la media aritmética como los máximos y mínimos para analizar los valores presentados. Por otro lado, para el histórico de crecimiento se emplearon tanto las medidas de tendencia central como las de posición para la interpretación de datos.

8.6.3. Aplicación de índices de crecimiento

Obtenidos los valores del histórico de crecimiento de las plantas, se aplicó el índice de crecimiento relativo (ICR) descrito en la **Tabla 5**, considerando los valores finales e iniciales de las variables de estudio para cada planta. Aplicado el índice, se procedió a realizar la representación gráfica de los datos obtenidos generando una curva de crecimiento en función del tiempo de cultivo.

Para el segundo índice de crecimiento se empleó el registro fotográfico para hallar el área de cada hoja, lo cual se realizó haciendo uso del programa *ImageJ*, destinado al procesamiento de imágenes que permite cálculo de áreas, este dato a su vez fue contrastado con la cantidad de hojas de cada planta, lo que permitió obtener un promedio del área foliar de cada ejemplar.

En la cuantificación del índice de área foliar (IAF), fue necesario conocer el área de suelo; que para efectos de este estudio correspondió a la sección del tubo ocupada por cada planta, la cual se calculó de acuerdo a las dimensiones obtenidas y presentadas en el diseño del montaje. Una vez se obtuvo el área foliar y el área del tubo se aplicó la ecuación para IAF descrita en la **Tabla 5**.

8.6.4. *Análisis de covarianza ANOVA*

El análisis de covarianza ANOVA es un caso especial de la modelización econométrica que permite comparar una variable cuantitativa en función de unos grupos (Vicéns, Herrarte, & Medina, 2005). Esta prueba estadística considera la dispersión de los datos en la comparación de medias o de grupos para analizar si más de dos grupos difieren significativamente entre sí (Ciberrnova, 2006).

Esta prueba permite conocer y aceptar cuál de la dos posibles hipótesis es aportada por los datos; las dos hipótesis corresponden a (i) la hipótesis de investigación, la cual propone que los grupos difieren significativamente ($p < 0,05$) entre sí y (ii) la hipótesis nula propone que los grupos no difieren significativamente ($p > 0,05$) (Ciberrnova, 2006).

Mediante el paquete estadístico para las ciencias sociales (SPSS por sus siglas en inglés) en su versión diecinueve (V19) se emplearon dos pruebas, la prueba ANOVA que permite obtener un valor de significancia, SPSS de igual forma permite calcular el estadístico de Leve o prueba de homogeneidad. Así mismos, se obtuvieron las comparaciones múltiples dadas por el HSD de Tukey tomando la prueba ANOVA como base para la corroboración de la hipótesis de investigación estadística.

9. Resultados y análisis

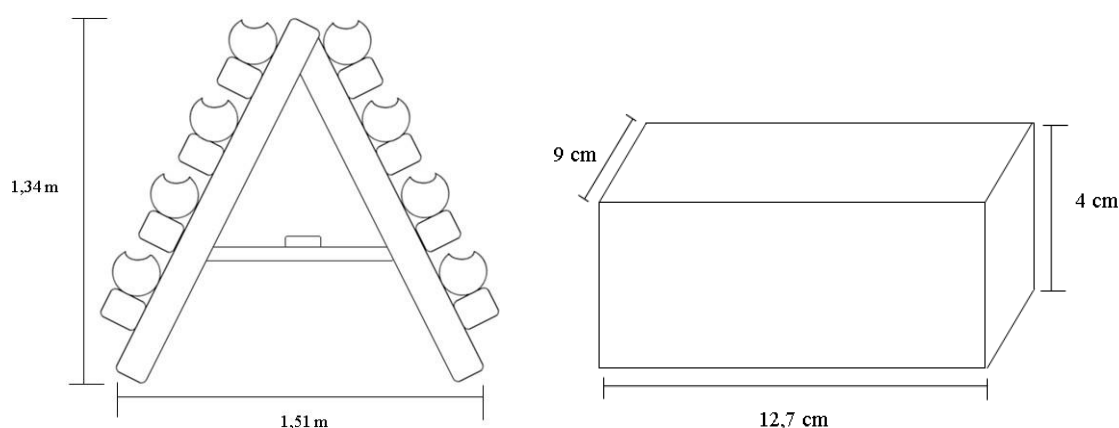
9.1. Estructuración del sistema

El sistema se constituyó de una tubería compuesta por veintidós (22) tubos PVC de diferentes diámetros en función de crecimiento, recirculación o de invernadero; una (1) base de madera, ocho (8) tacos de madera destinados al soporte de los tubos de crecimiento, treintauno (31) adaptaciones (tanto para tubería como para fijación) y una capacidad para cuarenta (40) plantas.

El montaje hidropónico y el invernadero se adecuaron en la zona de estudio en el transcurso de tres semanas. Estos se emplearon para un periodo de crecimiento de cinco semanas, iniciando su uso al finalizar la semana de adaptación de las plantas sembradas en tierra.

9.1.1. Diseño de sistema hidropónico vertical.

Las dimensiones consideradas para la estructura del sistema estuvieron dadas tanto por el modelo vertical, como por las dimensiones de espacio requerido entre cada planta hacia los lados, la parte superior y la profundidad a medida que se da el desarrollo de raíces.



Nota. La vista lateral se presenta a la izquierda y las dimensiones de los soportes empleados a la derecha.

Figura 3. Dimensiones del montaje hidropónico, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

El montaje hidropónico contó con una pendiente promedio del 1,61 %, siendo la pendiente más pronunciada (2,8%) encontrada en el tubo de crecimiento del tercer nivel del montaje, con el fin de evitar el estancamiento de la solución. Por otro lado, la pendiente menor

(0,4%) se ubica en el último tubo adyacente al suelo, de este modo se mantuvo constante el nivel de agua que llegaba al tanque de almacenamiento de solución. Con respecto al área del montaje, esta se estimó en aproximadamente dos metros cuadrados ($1,9 \text{ m}^2$).

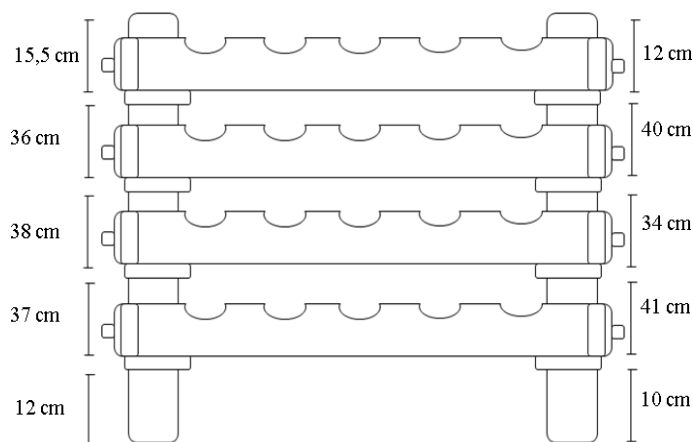


Figura 4. Vista frontal del montaje hidropónico, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

El área al interior del tubo estimada para el crecimiento de las raíces y el tallo por cada planta corresponde a $365,5 \text{ cm}^2$. Por otra parte, el espacio destinado para el crecimiento lateral es de 10 cm, mientras el espacio disponible para el crecimiento vertical no cuenta con ninguna limitación debido al diseño. El volumen del tubo disponible por planta se estimó en $2848,29 \text{ cm}^3$.

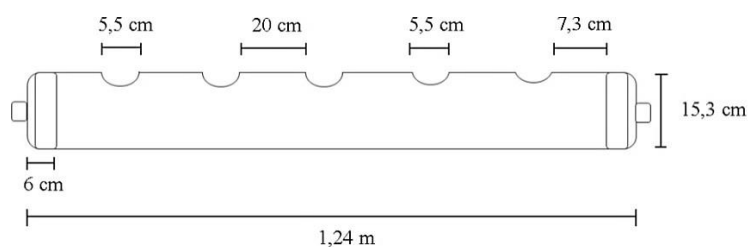
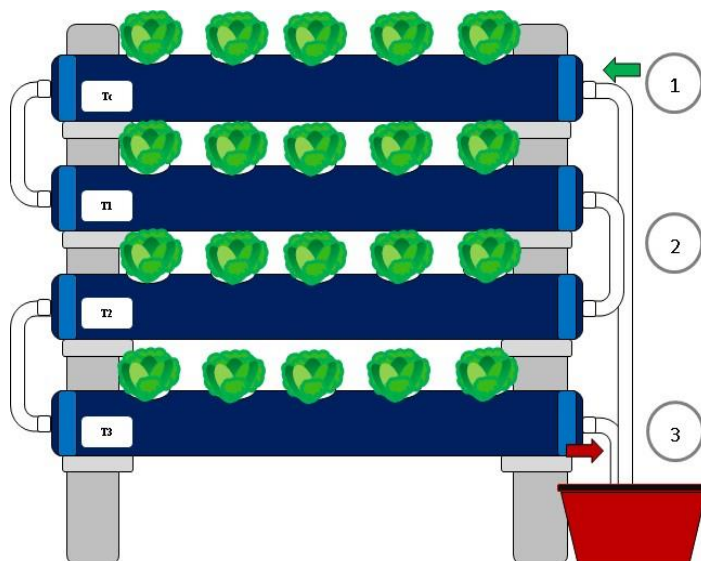


Figura 5. Dimensiones de tubos PVC de crecimiento, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

- Componentes del montaje

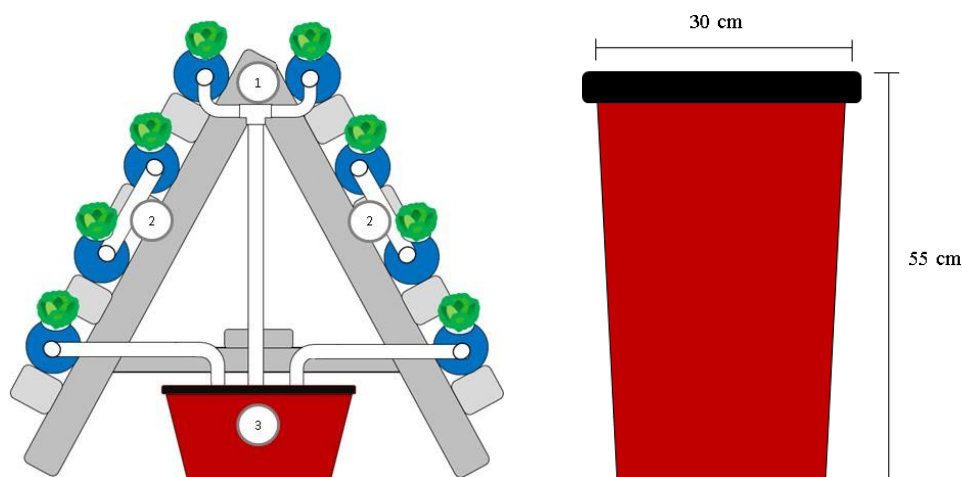
El sistema se compone diferentes elementos, estos se conectan en el transporte de la solución nutritiva dado por los tubos donde se ubican las plantas y el sistema de recirculación, el cual incluye la bomba sumergible y el tanque de almacenamiento o depósito de agua. Con respecto al

nivel del suelo, el tanque de almacenamiento de la solución nutritiva cuenta con 11 cm de altura y se ubica en la parte derecha lateral del montaje. A continuación se presenta una representación gráfica de los componentes del montaje



Nota. Se presenta la vista frontal del montaje hidropónico donde 1: Entrada de agua; 2: Tubería de recirculación de $\frac{1}{2}$ in; 3: Depósito o almacenamiento de solución.

Figura 6. Vista frontal de los componentes del montaje hidropónico, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020



Nota. Se presenta la vista lateral al lado izquierdo donde 1: Entrada de agua; 2: Tubería de recirculación de $\frac{1}{2}$ in; 3: Depósito o almacenamiento de solución y las dimensiones del tanque de almacenamiento al lado derecho.

Figura 7. Vista lateral de los componentes del montaje hidropónico, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

Consideradas las dimensiones de la **Figura 7** y aplicando la **Ecuación 1** se obtuvo 0,0388 m³ o 38,8 litros, correspondiente a la capacidad del tanque de almacenamiento de la solución nutritiva. Por otro lado, el volumen de solución necesaria por tubo se estimó en 7,57 litros aproximadamente y el volumen total de recirculación del montaje en 97,4 litros.

- Diseño de Invernadero

El diseño de invernadero tipo túnel se realizó considerando las dimensiones del montaje, la adecuada circulación de aire, entrada de luz, protección y realización de los procesos de monitoreo; el área del invernadero se estimó en cuatro metros cuadrados (4 m²). A continuación se presenta gráficamente las dimensiones del invernadero.



Nota. Diseño en PVC donde 1: Tubería de ¾ in. Elaborado por: (Hunt, 2002).

Figura 8. Diseño de invernadero tipo túnel, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

9.1.2. Incorporación y distribución de sustratos

Ejecutado el montaje se realizó la incorporación de sustratos; el espacio destinado para el sustrato se consideró en el 40% del volumen del tubo, aplicando la **Ecuación 1** y los porcentajes del 70% o 30% se consideraron con respecto al nuevo volumen como se presenta a continuación.

$$V_{\text{tubo de crecimiento}} = \pi * \left(\frac{15,3 \text{ cm}^2}{2} \right) * 124 \text{ cm}$$

$$V_{\text{tubo de crecimiento}} = 22797,88 \text{ cm}^3$$

Realizando la conversión a m^3 y a litros se obtiene un volumen total del tubo de crecimiento de $0,0227 m^3$ y $22,7 L$ respectivamente. Al aplicar el porcentaje del 40% se obtiene un volumen ocupado por el sustrato de $9,08 L$.

$$P1 \rightarrow 70\% * 9,08L = 6,356 L$$

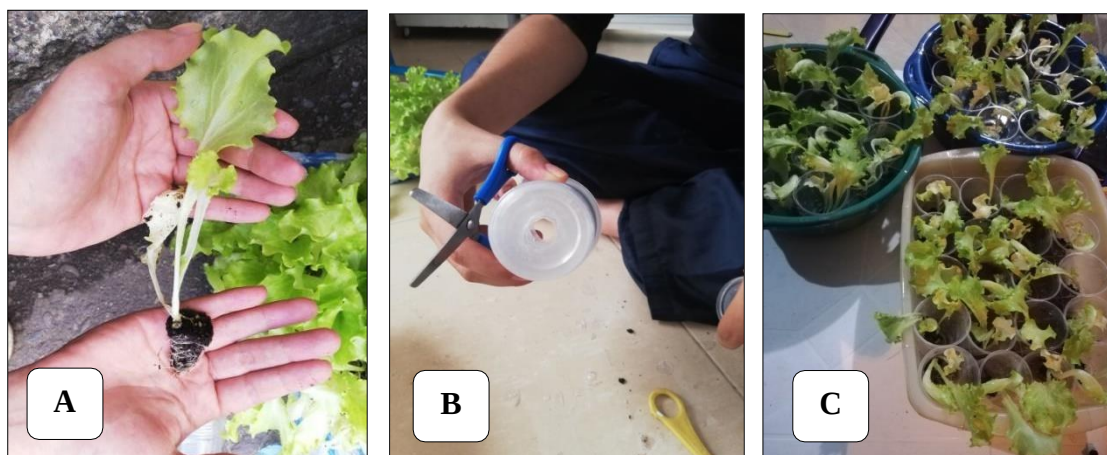
$$P2 \rightarrow 30\% * 9,08L = 2,724 L$$

9.2. Adecuación y monitoreo de elementos del montaje

Durante la fase de ejecución, se realizó un control individual de cada una de las partes del montaje, de forma que las adaptaciones (Vasos, tubos y orificios) realizadas al experimento permitieron un correcto desarrollo de las actividades de monitoreo y facilitaron la toma de datos.

9.2.1. Recepción y adecuación de plántulas

Al momento de la recepción de las plantas, estas se encontraban en un buen estado, con una porción de suelo en las raíces (que sujetaban firmemente) y presentaron un distinguido color verdoso, un tallo blanco y raíces color hueso levemente desarrolladas. Las plantas contaban con tres hojas en su mayoría y median en promedio, quince centímetros (15 cm) de longitud aproximadamente.



Nota. Se presenta el proceso de adecuación de las plantas donde A: Recepción; B: Preliminares; C: Adaptación para periodo de transición hidropónica.

Figura 9. Adecuación de plantas de lechuga, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

9.2.2. Adecuación y desinfección de sustratos

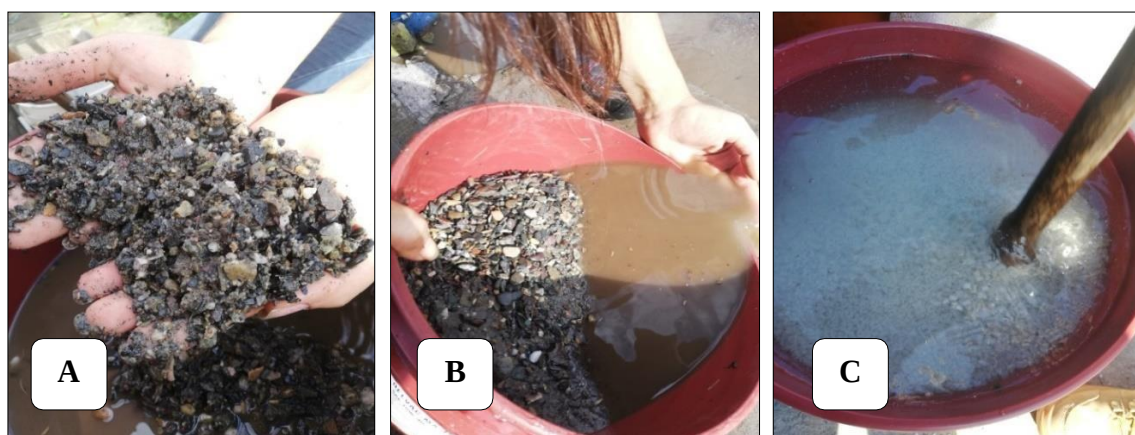
Con respecto a sustratos, en su limpieza inicial se empleó aproximadamente dieciséis litros de agua (16 L); el agua residual fue vertida al suelo en una zona aledaña de pastizal. En cuanto a la desinfección, se empleó la **Ecuación 2** y siguiendo las consideraciones de la **Tabla 7** se aplica la igualdad a continuación.

$$\text{Agua a agregar} = \frac{\% \text{Volumen de NaClO}}{\text{Concentración deseada}} - \text{Volumen del soluto}$$

$$\text{Agua a agregar} = \frac{0,52 \text{ L}}{5\%} - 4 \text{ L}$$

$$\text{Agua a agregar} = 6,4 \text{ L}$$

La concentración del desinfectante en total adquiere un volumen de 10,4 litros con una concentración de 5% de hipoclorito de sodio. La cantidad de agua empleada para la desinfección fue en total de 20,8 litros los cuales se reusaron en labores domésticas.



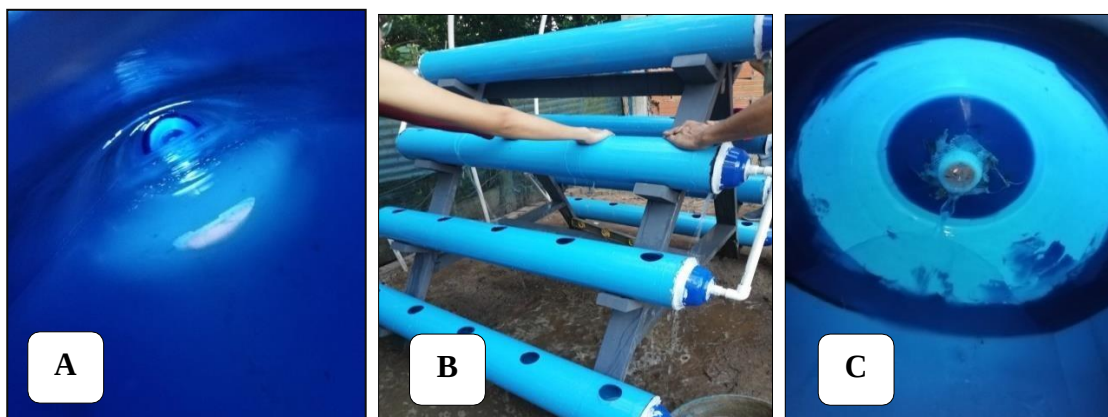
Nota. Se presenta el proceso de adecuación de sustratos donde A: Selección; B: Lavado; C: Desinfección.

Figura 10. Limpieza y desinfección de sustratos, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

9.2.3. Limpieza del montaje

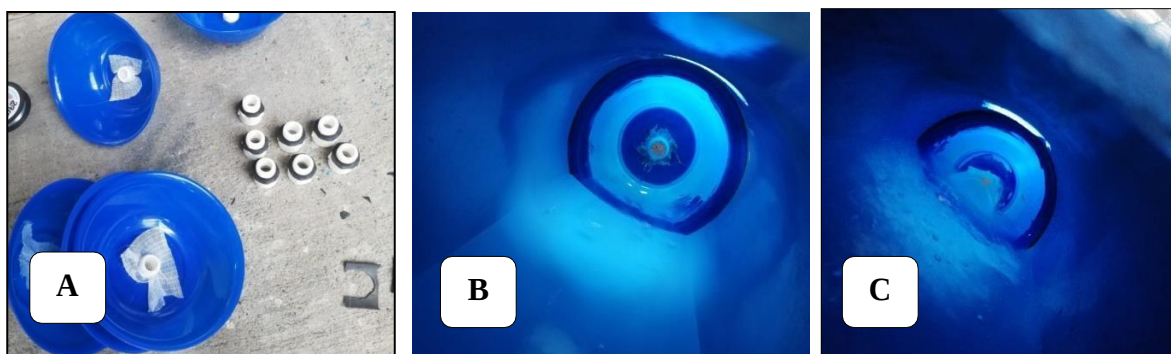
Empleando la bomba sumergible a su caudal máximo se realizó el lavado del montaje el cual tomó por nivel alrededor de tres minutos. Gracias a este procedimiento se determinó el agua necesaria para mantener el correcto nivel de solución entre 97 a 98 litros en total para el sistema.

De igual forma, permitió la verificación del funcionamiento correcto de la recirculación del agua, previo a la incorporación de la solución nutritiva. Asimismo, se corroboró el funcionamiento de los filtros con diferentes flujos (máximos y mínimos) y una vez se agregaron los tratamientos, siendo estos bastante eficientes.



Nota. Registro fotográfico donde A: Vista interior; B: Vista exterior; C: Filtros.

Figura 11. Limpieza interna del montaje, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020



Nota. Registro fotográfico donde A: Filtros, B: y C: Flujos de limpieza..

Figura 12. Adecuación del sistema de filtración, Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

9.2.4. Pre trasplante

Previo al proceso de trasplante, la preparación tanto de la solución como la de los tratamientos y el montaje, se llevó a cabo tres ejercicios de recirculación en el montaje para observar su dinámica con el fin de realizar la verificación en conjunto de todos los elementos. El ejercicio final fue positivo, ya que se realizaron las correcciones brindadas por los ejercicios anteriores.

9.2.4.1. Solución nutritiva

La concentración inicial de solución nutritiva inicial preparada, se realizó según las recomendaciones dadas por el proveedor, donde se expresaba que por kilogramo de fertilizante se requerían 200 litros de agua. Sin embargo, preparada dicha solución la conductividad marcada por el equipo fue bastante alta (registrando valores superiores a 6 ms/cm), sobrepasando dos veces las recomendaciones ideales de la solución presentados en la **Tabla 9**, por tal motivo se agregó agua para estabilizar la solución y aplicando **Ecuación 4** e iterando la **Ecuación 3** se determinó el rango en partes por millón que debía tener la solución.

Se halla la masa del agua (solvente), tomando como base para obtener la relación un litro de agua (1 L) o 0,001 m³.

$$Masa (Kg) = Densidad \left(\frac{Kg}{m^3} \right) * Volumen (m^3)$$

$$Masa\ solvente(Kg) = 996,86 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) * 0,001 (m^3)$$

$$Masa\ solvente (Kg) = 0,9986 kg$$

Un valor óptimo de partes por millones ideal para la solución es de 1500 ppm, que expresado en unidades de conductividad eléctrica es de 2,5 ms/cm aproximadamente. Iterando la ecuación se obtiene:

$$ppm = \frac{mg\ Soluto}{Kg\ Soluto + Kg\ Solvente}$$

$$1500\ ppm = \frac{mg\ Soluto}{Kg\ Soluto + 0,9986\ kg}$$

$$1500\ ppm = \frac{1500\ mg}{0,0015\ Kg + 0,9986\ kg}$$

Siguiendo este parámetro, se obtuvo que por cada litro de agua requerido para la solución se debe agregar 1500 miligramos de fertilizante (1,5 gramos), o por cada kilogramo de fertilizante se requieren de 670 litros de agua.

9.2.4.2. Sistema hidropónico

El sistema hidropónico incluyó el montaje, el invernadero y los equipos que permitieron realizar las lecturas y el monitoreo. A continuación se presenta el registro fotográfico del sistema hidropónico con sus elementos previo al trasplante de las plántulas.

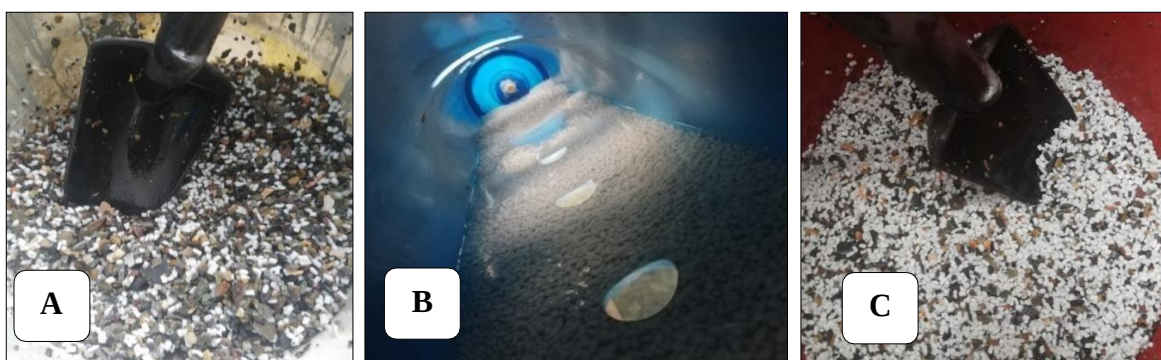


Nota. Registro fotográfico donde 1: poli sombra; 2: Tubos de crecimiento; 3: tanque de almacenamiento; 4: tubos de recirculación; 5: Termohigrómetro; 6: recubierta de plástico.

Figura 13. Montaje hidropónico bajo invernadero. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

9.2.4.3. Tratamientos

Los tratamientos una vez desinfectados se prepararon en un periodo de dos horas. A continuación se presenta el registro fotográfico de los sustratos integrados al sistema.



Nota. Proceso de adecuación donde A: 70% Gravilla, 30% PET; B: 100% PET; C: 70% PET, 30% Gravilla.

Figura 14. Preparación de tratamientos experimentales. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

9.2.5. Trasplante de plántulas

Al momento del trasplante las plantas contaban con 25 días de germinación, el trasplante se realizó desde el vaso al cual se habían adecuado para su periodo de transición y se ubicó en cada orificio del tubo de crecimiento; de este modo se dejó que las raíces colgaran y a su vez que estas tocaran ligeramente la solución. Las raíces para este punto contaban con una longitud aproximada de ocho a diez centímetros (8 a 10 cm).

Las plantas presentaban cuatro hojas en promedio y seguían conservando su color verdoso distinguido y raíces notablemente más claras debido al cambio de ambiente. Sin embargo, en días calurosos estas presentaban un comportamiento diferente y recostaban sus hojas en los tubos, al llegar la noche estas recobraban su postura y se mostraban más vigorosas al igual que días en que se presentaba precipitación.



Nota. Registro fotografico donde A: Vista general; B: Acercamiento.

Figura 15. *Trasplante de plantas a montaje hidropónico. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.*

El uso de los vasos plásticos permitió a las plantas tener un soporte inicial para su crecimiento y fue de gran utilidad en días calurosos, pues permitía a la planta tener una posición lo bastante rígida para tomar el sol y desarrollarse en el área del tallo. Por otro lado, al encontrarse en estos vasos las plantas facilitó la toma de datos y permitió evidenciar el crecimiento de la planta.

9.3. Monitoreos

9.3.1. Registro de condiciones microclimáticas

Dada la medición diaria de condiciones al interior del invernadero, se obtuvo en general días cálidos y soleados con pocas precipitaciones debido a la temporada de verano que inició desde finales del mes de octubre.

- Humedad Relativa

En las condiciones presentadas del invernadero se obtuvo en promedio, una humedad relativa del 79%, siendo el pico más alto 99% y el mínimo de 47% para horas de la mañana y al medio día respectivamente. El registro más alto se presentó a inicios de noviembre el día nueve y el más bajo se obtuvo a finales del mismo mes el día treinta.

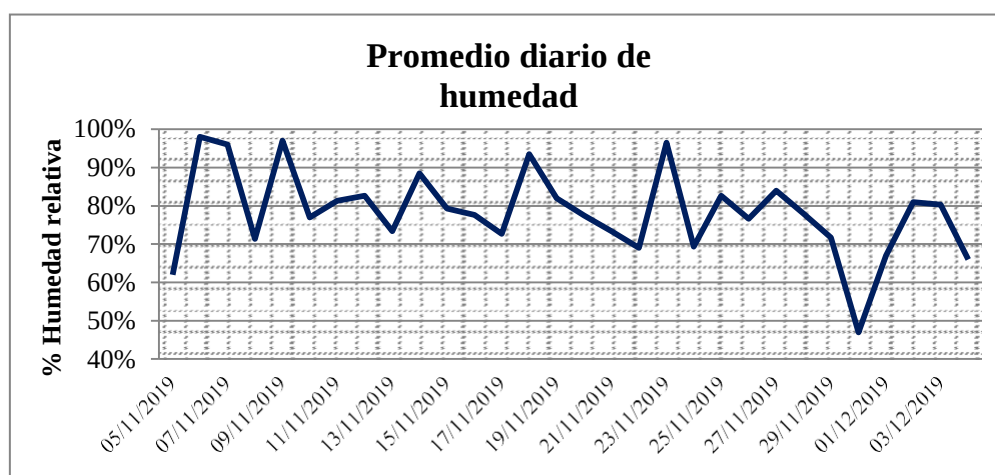


Figura 16. Promedio diario de humedad para invernadero Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

- Temperatura

Con respecto a la temperatura registrada, se obtuvo en promedio 26,1 °C al interior del invernadero, siendo la temperatura mínima 20,6° y la máxima registrada de 34,1 °C para horas de la noche y tarde respectivamente. La temperatura mínima se presentó a inicios del mes de noviembre, mientras la máxima se presentó a finales del mismo mes.

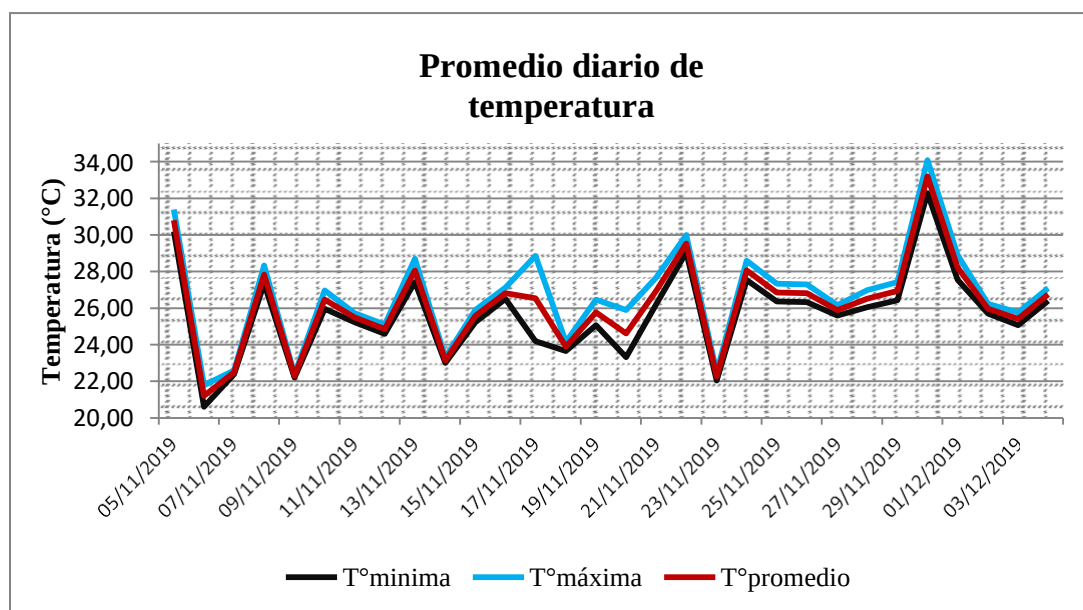


Figura 17. Promedio diario de temperatura para invernadero Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

9.3.2. Registro de concentraciones de la solución nutritiva

Los datos de la concentración de la solución nutritiva se registraron considerando las variables de pH, conductividad, O₂ y temperatura; en estos se obtuvo una diferencia notable, al ajustar la relación entre volumen de agua y fertilizante para la corrección de la solución. A continuación se presentan los promedios de las mediciones realizadas con el multiparámetro para cada variable.

Tabla 11. Promedio de variables de la solución nutritiva.

Medición N°	Fecha	Parámetro			
		Potencial de Hidrogeno	Conductividad (ms/cm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Temperatura Agua (°C)
1	5-7/11/2019	6,79	6,32	6,88	26,30
2	12-13/11/2019	7,22	3,24	7,53	26,20
3	18-20/11/2019	6,62	2,60	7,26	26,46
4	27-29/11/2019	5,64	1,82	6,79	27,58
5	3-4/12/2019	5,00	1,84	7,26	25,98

Nota: Los valores de color rojo representan datos con inconsistencias debido a la calibración que presentaba el equipo en el momento. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

9.3.3. Registro de crecimiento de plantas

Los datos que conforman el registro o historial del crecimiento de las plantas por tratamiento, tanto el de control como los experimentales, se presentan a continuación.

Tabla 12. Historial de crecimiento para tratamiento de control (Tc).

Fecha	07/11/19			17/11/19			03/12/19			09/12/19		
	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)
	L	A		L	A		L	A		L	A	
A 1.1	7,6	5,0	2,5	14,3	7,5	3,5	21,5	13,1	32,0	23,7	15,8	41,0
A 1.2	8,1	5,1	2,5	16,3	8,3	3,0	22,6	15,6	31,1	22,7	17,6	40,0
A 1.3	3,3	2,1	2,0	8,6	5,1	4,0	17,8	10,0	23,9	19,6	12,3	30,2
A 1.4	4,5	2,8	3,0	10,3	6,1	3,0	21,3	13,6	25,8	22,3	16,0	33,0
A 1.5	7,3	4,6	3,0	16,6	9,6	4,0	22,0	17,0	23,0	22,4	17,8	29,0
B 1.1	7,6	4,7	2,0	12,0	6,6	3,0	21,8	12,3	31,9	22,3	14,3	41,0
B 1.2	7,1	4,3	2,0	11,6	6,8	3,0	20,6	12,6	23,1	21,8	16,0	29,5
B 1.3	3,3	2,5	2,0	8,0	4,6	4,0	18,5	10,1	18,0	19,6	12,3	22,4
B 1.4	5,8	4,3	3,0	10,1	5,6	4,0	20,6	13,6	23,0	21,7	16,8	29,0
B 1.5	2,6	1,67	1,2	7,3	4,3	3,0	17,8	13,7	17,8	19,0	14,7	22,5

NOTA: Resultados del crecimiento en las plantas por tratamiento, tanto el de control como los experimental. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Tabla 13. Historial de crecimiento para tratamiento uno (T1).

Fecha	07/11/19			17/11/19			03/12/19			09/12/19		
	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)
	L	A		L	A		L	A		L	A	
A 2.1	7,1	4,5	2,0	12,0	6,3	3,5	18,3	11,1	24,8	20,4	14,4	31,5
A 2.2	4,8	3,1	2,0	11,3	7,1	4,0	19,0	10,5	23,0	19,6	12,5	29,0
A 2.3	2,0	1,5	2,0	7,3	4,6	3,5	17,7	9,0	16,8	18,6	10,8	21,0
A 2.4	6,6	4,8	2,0	11,5	7,8	3,0	21,3	15,0	26,6	22,4	17,7	34,0
A 2.5	4,1	2,8	1,5	13,1	7,5	4,5	19,6	14,5	23,1	20,5	17,2	29,0
B 2.1	7,5	4,5	2,0	6,6	4,0	4,0	17,5	8,1	26,1	18,8	12,1	33,0
B 2.2	6,3	4,3	0,5	9,6	5,1	5,0	18,1	9,4	26,3	19,1	11,5	33,0
B 2.3	8,0	4,3	2,0	10,8	6,5	3,5	18,5	10,5	25,2	20,7	15,4	32,0
B 2.4	4,0	2,5	2,0	11,6	6,5	3,0	18,3	10,1	27,3	19,1	14,6	35,0
B 2.5	6,3	3,3	2,0	13,6	6,8	3,0	19,4	13,1	26,2	20,1	18,6	33,5

NOTA: Resultados del crecimiento en las plantas por tratamiento, tanto el de control como los experimental. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Tabla 14. *Historial de crecimiento para tratamiento dos (T2).*

Tabla 1. Historia de crecimiento para tratamientos dos (12).												
Fecha	07/11/19		17/11/19		03/12/19		09/12/19					
Planta	Hoja (cm)	Tallo (cm)	Hoja (cm)	Tallo (cm)	Hoja (cm)	Tallo (cm)	Hoja (cm)	Tallo (cm)				
	L	A	L	A	L	A	L	A				
A 3.1	2,8	1,3	0,8	5,1	3,8	5,0	14,7	7,8	20,2	15,1	11,2	25,0
A 3.2	8,3	5,5	1,5	17,3	8,5	3,0	21,5	15,0	34,6	22,2	16,4	44,5
A 3.3	7,3	4,6	2,0	17,1	9,8	6,0	23,2	15,1	28,8	24,2	16,9	36,0
A 3.4	2,5	1,3	2,5	12,3	6,3	4,0	18,6	12,2	20,7	19,8	15,5	26,0
A 3.5	7,1	5,1	1,0	16,0	10,6	4,7	20,8	18,1	27,0	21,6	19,0	34,0
B 3.1	4,5	2,5	0,5	7,0	3,9	3,5	16,6	7,3	21,4	17,0	10,2	27,0
B 3.2	6,5	4,1	1,0	11,3	6,3	3,0	19,0	10,3	31,9	19,7	13,5	41,0
B 3.3	5,1	3,3	0,5	8,6	4,6	3,0	18,2	9,0	25,8	20,0	12,6	33,0
B 3.4	5,6	3,8	0,5	14,6	8,1	3,5	18,7	12,1	30,9	19,6	15,6	39,5
B 3.5	6	3,7	0,5	16,3	8,5	4,0	20,2	13,6	28,7	21,4	19,0	36,5

NOTA: Resultados del crecimiento en las plantas por tratamiento, tanto el de control como los experimental. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Los valores dados en hojas corresponden a un promedio obtenido de tres mediciones de hojas de diferentes tamaños, esto se aplicó a todos los tratamientos. En el caso de la longitud o largo del tallo, el valor es único y fue la medición que más se dificultó en tomar debido a la fragilidad de las plantas generando valores aproximados.

Tabla 15. *Historial de crecimiento para tratamiento tres (T3).*

Fecha	07/11/19		17/11/19		03/12/19		09/12/19					
Planta	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)	Hoja (cm)		Tallo (cm)			
	L	A		L	A		L	A				
A 4.1	6,3	3,6	2,0	10,6	6,5	3,5	17,0	9,3	22,5	17,9	11,6	28,5
A 4.2	5,0	2,8	1,0	12,0	7,1	4,0	21,1	13,9	22,1	21,3	15,3	27,8
A 4.3	8,3	4,6	0,5	14,3	8,3	4,5	18,5	12,4	23,1	19,7	13,3	29,0
A 4.4	8,5	5,5	0,5	14,5	9,5	3,0	21,5	16,8	22,0	22,3	19,4	28,0
A 4.5	8,1	4,6	0,5	15,1	8,6	2,5	20,1	16,3	21,1	20,3	16,7	27,0
B 4.1	7,3	5,1	0,5	12,6	6,6	3,0	20,5	10,5	28,5	21,8	13,8	36,5
B 4.2	7,1	5,5	1,5	12,1	7,5	4,2	19,6	11,5	17,3	20,8	13,9	21,5
B 4.3	7,6	5,1	1,5	12,6	7,0	4,0	22,3	12,7	29,5	23,0	15,3	37,5
B 4.4	6,0	4,8	3,0	13,0	7,8	3,0	21,3	12,3	24,3	22,5	14,9	31,0
B 4.5	7,8	4,8	0,8	16,3	9,0	4,0	20,4	16,0	23,0	22,7	19,3	29,0

NOTA: Resultados del crecimiento en las plantas por tratamiento, tanto el de control como los experimental. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

9.4. Valoración de datos finales

Terminada la cosecha, se obtuvieron dos datos relacionados al montaje; (i) la masa total de las plantas se estimó en 1670 gramos de hoja comestible, alcanzado un promedio de 41,75 gr/planta y un rendimiento de producción de hoja de 0,878 kg/m², el cual es significativamente mayor con respecto a los rendimientos de la **Tabla 1**; (ii) en cuanto al PET, el volumen reciclado se estimó en 28,33 Kg aproximadamente; representando alrededor de 435 botellas plásticas de tres litros.

9.4.1. Tratamiento estadístico inicial de datos finales

Dados los valores obtenidos en la recolecta final de las plantas, se aplican las medidas de tendencia central y de posición para las medidas de las hojas, raíz y tallo.

Tabla 16. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento de control (Tc).

Planta	Hojas					Raíz		Tallo
	Medidas de ejemplares					Longitud		Diámetro
Tc	Nº		(cm)			máx	(cm)	(cm)
		Largo (L) Ancho (A)	#1	#2	#3			
A 1.1	14	L	23	23,5	24,7	30,6	41	0,8
		A	15,5	16	16			
A 1.2	15	L	22,3	22	24	28,4	40	0,9
		A	17	18	18			
A 1.3	10	L	21	19	19	25,5	30,2	0,7
		A	13	12,5	11,5			
A 1.4	12	L	24	21	22	27,4	33	1,1
		A	15,5	17	15,5			
A 1.5	18	L	19,5	21,3	23	32	29	1,7
		A	18,5	15,5	19			
B 1.1	13	L	23,5	22	21,5	35	41	0,7
		A	14	15	14			
B 1.2	12	L	22,5	22	21	32,5	29,5	0,8
		A	17,5	16,5	14			
B 1.3	11	L	20,5	19,8	19	25	22,4	0,7
		A	12	12,4	12,5			
B 1.4	15	L	21,3	22	22	34	29	1
		A	15	17,5	18			
B 1.5	12	L	20	18	18,6	24,5	22,5	1,1
		A	13,5	15	15,6			

NOTAS. Resultado de la aplicación de las medidas de tendencia central y de posición para las medidas de las hojas, raíz y tallo. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Para el tratamiento de control (Tc) se obtuvo en promedio un número de hojas de 13,2 por planta, siendo el mayor valor de 18 y el menor número de hojas 10. Por otra parte, la longitud de la raíz alcanzó valores de hasta 35 cm y registró un promedio de 29,5 cm.

Con respecto al tallo, se obtuvieron valores de 31,76 cm y 0,95 cm en promedio, para las medidas de longitud y diámetro respectivamente, siendo los valores mínimos de dichas medidas de 22,4 cm y 0,7 cm en ese mismo orden. En cuanto a las hojas, la media general se estimó en 21,43 cm para el largo y 15,37 cm para el ancho.

Tabla 17. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento uno (T1).

Planta		Hojas				Raíz		Tallo
T1	N°	Medidas de ejemplares (cm)				Longitud máx (cm)	Longitud (cm)	Diámetro (cm)
		Largo (L) Ancho (A)	#1	#2	#3			
A 2.1	15	L	20,5	20,2	20,5	16-20	31,5	0,9
		A	16,3	15	12			
A 2.2	13	L	20,5	18,5	20	18	29	0,8
		A	10,5	13	14			
A 2.3	8	L	22,5	22,4	22,5	16-16,5	21	0,6
		A	15,5	18	18			
A 2.4	12	L	21,2	20	20,4	18-19	34	1
		A	15,5	10,8	-			
A 2.5	13	L	21,2	20	20,4	17,5-20	29	1,2
		A	16,5	17,2	18			
B 2.1	10	L	18,6	18,5	19,5	21,5-22,4	33	0,6
		A	13	12,4	10,9			
B 2.2	11	L	19,8	18,6	19	19,3-23	33	0,5
		A	11,5	10,9	12,3			
B 2.3	13	L	21,4	20	20,7	21	32	0,6
		A	15	15,5	15,7			
B 2.4	9	L	19,8	19,5	18,1	23-23,5	35	0,6
		A	15	14,5	14,3			
B 2.5	12	L	20	18,5	22	15,5-14,5	33,5	1,3
		A	19	21	16			

NOTAS. Resultado de la aplicación de las medidas de tendencia central y de posición para las medidas de las hojas, raíz y tallo. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

De igual forma, para el tratamiento número uno (T1) se obtuvo una media en el número de hojas de 11,6 por planta, con un mínimo de 8 hojas y un máximo de 15. En cuanto a la raíz, está en promedio registro 19,79 cm de longitud, llegando hasta un valor de 23,5 cm y un mínimo de 14,5 cm. Así mismo, el tallo presentó valores promedio de 31,1 cm para la longitud y 0,81 cm de diámetro, alcanzando los valores máximos de 35 cm y 1,3 cm para dicha mediciones.

Por otro lado, las dimensiones de las hojas registraron una media general de 20,16 cm y 14,68 cm para las mediciones del largo y ancho respectivamente, con mínimos de 18,87 cm y 11,57 cm en ese mismo orden.

Tabla 18. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento dos (T2).

Planta	Hojas				Raíz	Tallo		
T2	Nº	Medidas de ejemplares (cm)				Longitud máx (cm)	Longitud (cm)	Diámetro (cm)
		Largo (L) Ancho (A)	#1	#2	#3			
A 3.1	7	L	15,5	10,8	-	21,5	25	0,4
		A	8,8	16	-			
A 3.2	13	L	21,5	23	22,3	16	44,5	0,8
		A	15,6	16,6	17			
A 3.3	15	L	25,2	23,8	23,6	30,5-31	36	1,3
		A	15,2	19,6	16			
A 3.4	10	L	20,2	19,3	20	17,5	26	0,7
		A	16,3	15,2	15			
A 3.5	21	L	23	21	21	26	34	1,8
		A	17	20	20			
B 3.1	9	L	18,3	16,5	-	16	27	0,4
		A	10,5	10,2	-			
B 3.2	11	L	20,3	18	21	39	41	0,6
		A	15,5	10,5	14,7			
B 3.3	11	L	19,5	20	20,5	20,6	33	0,6
		A	12	13,4	12,5			
B 3.4	10	L	18,3	20	20,7	24,5	39,5	0,7
		A	14,5	16	16,4			
B 3.5	12	L	21,7	21,4	21,3	27,5-27,7	36,5	1,3
		A	17,5	20	19,7			

NOTAS. Resultado de la aplicación de las medidas de tendencia central y de posición para las medidas de las hojas, raíz y tallo. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Siguiendo con los tratamientos, para el número dos (T2), la cantidad de hojas por planta varió desde 7 a 21, dando un promedio de 11,9 como resultado y presentando los valores con mayor desviación estándar con respecto a los otros tratamientos.

Con respecto a la raíz, se registraron valores de longitud de hasta 39 cm, con una media estimada en 23,98 cm y un mínimo de 16 cm. De igual forma, el tallo presentó una media de longitud de 34,25 cm y una media de diámetro de 0,86 cm contando con valores mínimos para dichas mediciones de 25 cm y 0,4 cm. En cuanto a las hojas, se obtuvieron valores promedio de 19,94 cm y 15,5 cm para las dimensiones del largo y el ancho respectivamente.

Tabla 19. Medidas morfológicas de plántulas para tratamiento tres (T3).

Planta		Hojas				Raíz		Tallo
T3	N°	Medidas de ejemplares (cm)				Longitud máx (cm)	Longitud (cm)	Diámetro (cm)
		Largo (L) Ancho (A)	#1	#2	#3			
A 4.1	7	L	17	18,7	16,8	18	28,5	0,5
		A	11,3	11	11			
A 4.2	11	L	21,3	21	21,8	28-28,5	27,8	0,8
		A	14,5	16,5	14,9			
A 4.3	12	L	19,6	19,3	20,4	30,3	29	0,9
		A	15,1	11,4	13,5			
A 4.4	15	L	21,3	21,7	24	23-25,5	28	1,3
		A	17	21,2	16			
A 4.5	13	L	18,1	22	21	50-51	27	1,1
		A	16,3	16	17,3			
B 4.1	13	L	22	20,6	23	13,5-14	36,5	0,6
		A	14,1	11,8	15,5			
B 4.2	11	L	20	22	20,5	19,5-20,7	21,5	0,6
		A	12,5	15,5	13,7			
B 4.3	13	L	22	23,7	23,5	27	37,5	0,8
		A	14	16	15,9			
B 4.4	13	L	23,6	20,5	21,5	30	31	0,9
		A	16	15,7	13			
B 4.5	12	L	22	22,6	23,6	27	29	1,3
		A	18	20,5	19,6			

NOTAS. Resultado de la aplicación de las medidas de tendencia central y de posición para las medidas de las hojas, raíz y tallo. Por Laura Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Finalmente, en el tratamiento número tres (T3) se obtuvo en promedio 12 hojas por plantas, siendo el valor más alto 15 y el menor 7. En la raíz, se registró una media de 27,2 cm para la longitud, con un valor máximo de 51 cm y un mínimo de 14 cm. Así mismo, el tallo presentó 29,38 cm de media para la longitud y 0,88 cm de media para el diámetro. Con respecto a las hojas, se obtuvo un promedio para el largo de 21,17 cm y para el ancho de 15,16 cm.

9.4.1.1. Comparativos

La variable correspondiente al número de hojas de las plantas, presentó tanto para el lado A como para el lado B del montaje valores cercanos. Sin embargo, el lado A registró un número levemente mayor de hojas por planta; a su vez, el tratamiento de control (Tc) para el lado A presentó un mayor número de hojas, mientras en el lado B fue el tratamiento número tres (T3) el de mayor número de hojas.

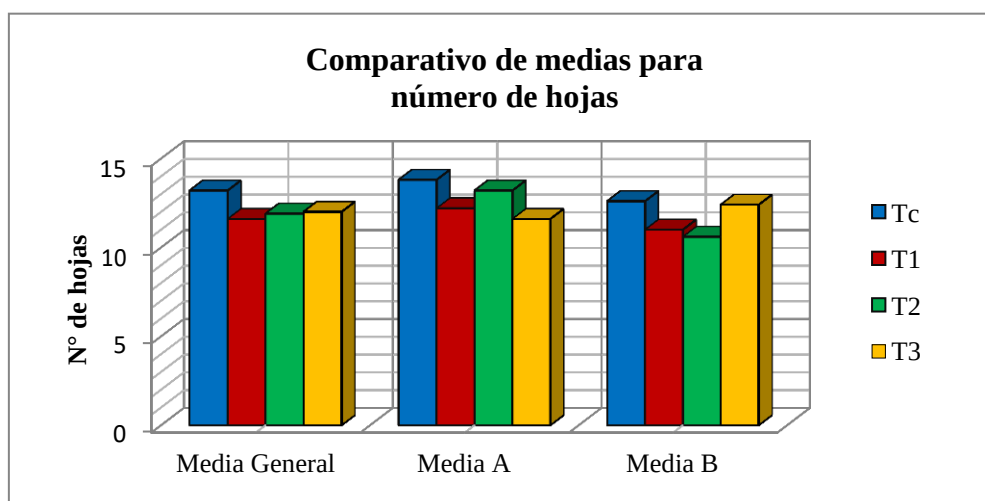


Figura 18. Comparativo de datos finales para medias de número de hojas. Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

De igual forma, para los datos obtenidos de las medidas de longitudes y dimensiones de las hojas expresadas en centímetros, se realiza también la representación gráfica de las medias representativas para cada tratamiento. Para estas, se tomó la media general de los datos obtenidos tanto en el lado A como en el B del montaje para cada una de las variables (longitud de raíz, longitud de tallo, largo hoja y ancho de hoja), de modo que se consideran las medidas del total poblacional de las plantas del montaje.

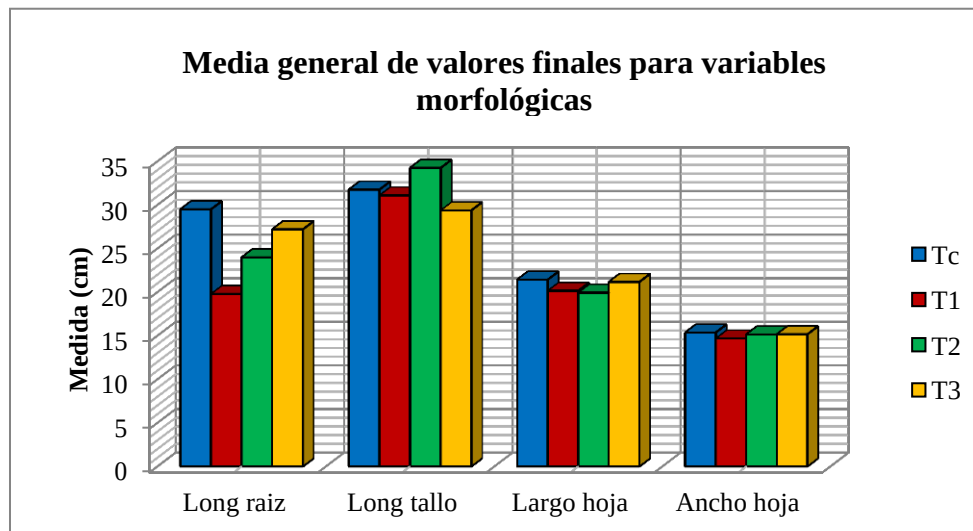


Figura 19. Media general de valores finales para variables morfológicas. Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Consideradas únicamente las medias de los datos finales obtenidos para las raíces, tallo y hojas de las plantas de la totalidad del montaje, se presentó para la variable de longitud de la raíz el valor más alto en el tratamiento de control (Tc); en el caso de la longitud del tallo, el valor mayor se obtuvo en el tratamiento número dos (T2); para el largo de las hojas, el tratamiento tres (T3) y el de control (Tc) registraron valores bastantes similares; con respecto al ancho de hoja los tratamientos de control (Tc), dos (T2) y tres (T3) obtuvieron valores cercanos siendo ligeramente superados por el de control.

Dado lo anterior, el tratamiento número uno (T1) presentó los valores de media más bajos para cada una de las variables de longitud de raíz, longitud y diámetro de tallo, ancho y largo de hojas, de modo que se considera como el tratamiento menos favorecedor; por el contrario, el tratamiento de control (Tc) registró los valores más estables en las plantas para cada una de las variables de crecimiento.

Aunque el tratamiento de control presentó para la variable de longitud de raíz la media más alta, en los tratamientos uno (T1), dos (T2) y tres (T3) la raíz se logró desarrollar de mejor forma y hacia los lados, contaban con una densidad visiblemente mayor a la del tratamiento de control (Tc) y en general la raíz se presentó más fuerte en estos tratamientos al momento de retirar las plantas.

9.4.2. Índices de crecimiento

9.4.2.1. Índice de crecimiento relativo (ICR)

Aplicando las igualdades de la **Tabla 5** se obtienen los índices que denotan el crecimiento de la planta. El índice ICR estima un diferencial de crecimiento (cm) en razón del tiempo (día).

Tabla 20. Índice de crecimiento relativo para longitud de tallo.

Tratamiento	Individuo									
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
Tc	1,20	1,17	0,88	0,94	0,81	1,22	0,86	0,64	0,81	0,67
T1	0,92	0,84	0,59	1,00	0,86	0,97	1,02	0,94	1,03	0,98
T2	0,76	1,34	1,06	0,73	1,03	0,83	1,25	1,02	1,22	1,13
T3	0,83	0,84	0,89	0,86	0,83	1,13	0,63	1,13	0,88	0,88

Para la variable de longitud de tallo, el tratamiento número dos (T2) presenta una media más alta con respecto a los otros tratamientos con un crecimiento de 1,037 cm/día, seguido del tratamiento de control (Tc) con 0,92 cm/día, el tratamiento número uno (T1) con 0,915 cm/día y finalmente el tratamiento tres (T3) 0,89 cm/día.

Tabla 21. Índice de crecimiento relativo para largo de hoja.

Tratamiento	Individuo									
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
Tc	0,5	0,46	0,51	0,56	0,47	0,46	0,46	0,51	0,50	0,51
T1	0,41	0,46	0,52	0,49	0,51	0,36	0,40	0,40	0,47	0,43
T2	0,39	0,44	0,53	0,54	0,45	0,39	0,41	0,46	0,44	0,48
T3	0,36	0,51	0,36	0,43	0,38	0,45	0,43	0,48	0,52	0,47

NOTA: Descripción cuantitativo de los promedios para largo de hoja, Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Con respecto al largo de hoja, el tratamiento de control (Tc) presentó la media más alta con un crecimiento estimado en 0,494 cm/día, seguido del tratamiento dos (T2) con 0,453 cm/día, el tratamiento número uno (T1) obtuvo 0,445 cm/día y finalmente el tratamiento tres (T3) 0,439 cm/día.

Tabla 22. Índice de crecimiento relativo para ancho de hoja.

Tratamiento	Individuo									
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
Tc	0,34	0,39	0,32	0,41	0,41	0,30	0,37	0,31	0,39	0,41
T1	0,31	0,29	0,29	0,39	0,45	0,24	0,23	0,35	0,38	0,48
T2	0,31	0,34	0,38	0,44	0,43	0,24	0,29	0,29	0,37	0,48
T3	0,25	0,39	0,27	0,43	0,38	0,27	0,26	0,32	0,31	0,45

NOTA: Descripción cuantitativo de los promedios para ancho de hoja, Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

De igual forma, para el ancho de la hoja en el tratamiento de control (Tc) se obtuvo la media de crecimiento más alta de 0,365 cm/día, seguido del tratamiento dos (T2) con 0,357 cm/día, el tratamiento uno (T1) registró 0,341 cm/día y el tratamiento tres (T3) 0,333 cm/día.

Considerado lo anterior, el tratamiento que en general presentó los valores más estables para índice de crecimiento corresponde al tratamiento de control (Tc), mientras el que obtuvo los valores más bajos correspondió al tratamiento (T3). Sin embargo, en los tratamientos dos (T2) y tres (T3) se presentaron también individuos con índices altos.

9.4.2.2. Curvas de fitomasa

Para las mediciones de la etapa de monitoreo y los índices de crecimiento se grafican las curvas de fitomasa (crecimiento o producción) en función del tiempo. Los valores registrados se obtuvieron en las plantas con contenido de humedad, bajo un método no destructivo.

En el crecimiento de las plantas dado en la **Figura 20** presentó dos picos, siendo el primero manifestado a los diecisiete días del trasplante; el segundo incremento se registró a los veintiséis días del cultivo, registrando valores más altos por un periodo aproximado de dos semanas. Los periodos de crecimiento se mantuvieron a una tasa constante para todos los tratamientos volviendo a ser constantes en una tasa menor hasta el día nueve de diciembre

Por otro lado, los tratamientos registraron entre si valores con una tendencia similar de crecimiento para la variable del largo de hoja sin presentar diferencias significativas, siendo el tratamiento tres (T3) el que presenta los valores más altos en la curva y el tratamiento uno (T1) el que obtuvo los valores más bajos.

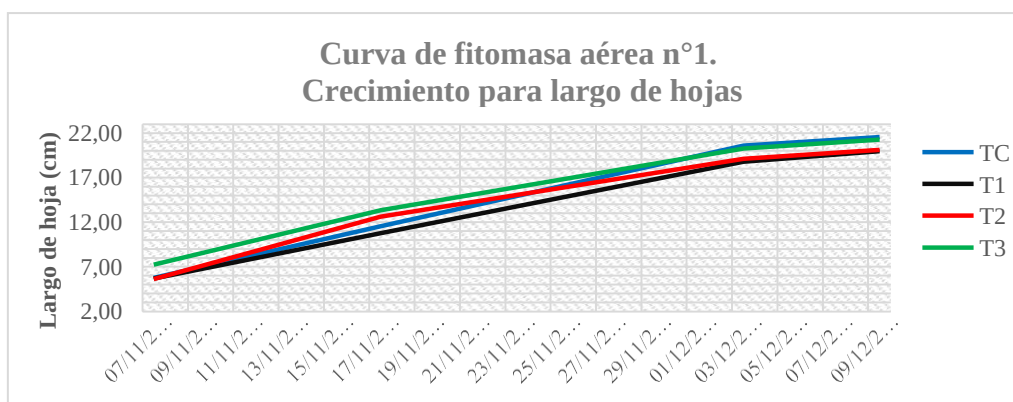


Figura 20. Curva de fitomasa aérea para largo de hojas. Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Para la variable del ancho de las hojas en la **Figura 21**, solo se presentó un pico el día tres de diciembre, manteniéndose desde el inicio del trasplante a una tasa constante para todos los tratamientos y registrando una tasa mayor hasta el día de la cosecha. Así mismo, el tratamiento que obtuvo los valores más altos para la curva de crecimiento correspondió al tratamiento tres (T3) y las diferencias entre tratamientos de igual forma no fueron significativas

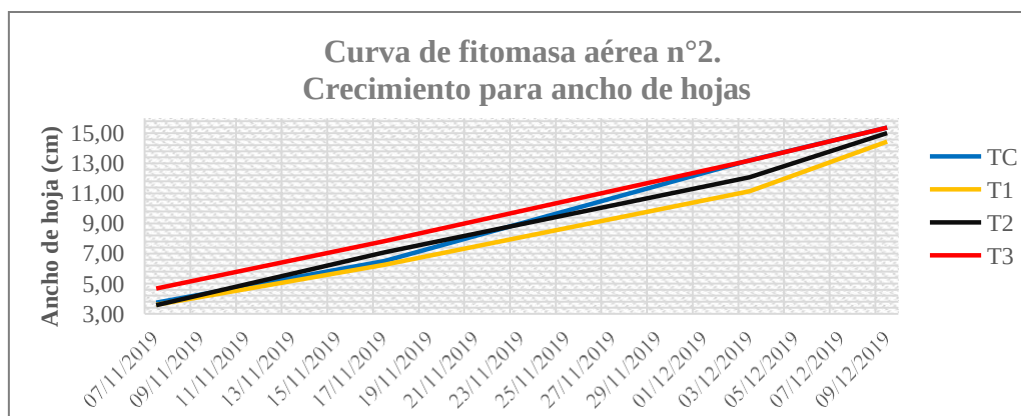


Figura 21. Curva de fitomasa aérea para ancho de hojas. Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Con respecto al crecimiento del tallo, la **Figura 22** presenta solo un pico el día 17 de noviembre a los diez días del trasplante, manteniendo una tasa constante de crecimiento hasta el día de la cosecha, siendo el tratamiento dos (T2) el que presentó los valores más altos entre las curvas. De mismo modo, las diferencias entre tratamientos no fueron significativas

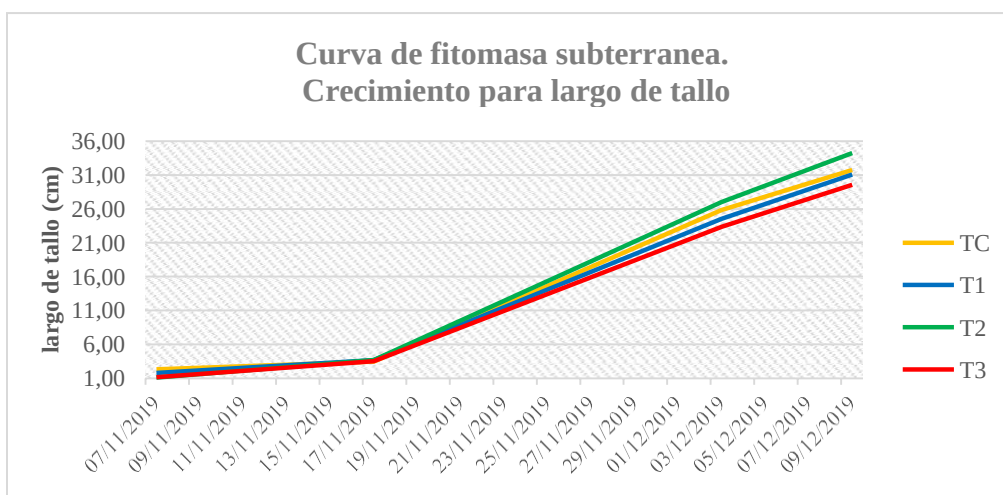


Figura 22. Curva de fitomasa subterránea para largo de tallo. Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Consideradas las curvas de fitomasa, se identifica que con respecto a las variables de las hojas (largo y ancho) el tratamiento que registró mayor crecimiento correspondió al tres (T3), mientras que para el tallo y raíces el tratamiento dos (T2) presentó la mejor curva de crecimiento

9.4.2.3. Índice de área foliar

Considerando las dimensiones de la **Figura 5** y la ecuación presentada en la **Tabla 5**, se obtiene el índice de área foliar que halla la relación del área ocupada por las hojas entre el área cultivada.

Tabla 23. Aplicación del índice de área foliar (IAF).

Tratamiento	Promedio área hojas (cm ²)	N° Hojas	Área Foliar (cm ²)	IAF	Media
TC	215,098	14	3011,372	7,718	6,331
	216,428	15	3246,42	8,321	
	159,542	10	1595,42	4,089	
	269,883	12	3238,596	8,301	
	272,107	18	4897,926	12,554	
	164,874	13	2143,362	5,494	
	26,821	12	321,852	0,825	
	25,656	11	282,216	0,723	
	255,09	15	3826,35	9,807	
	177,966	12	2135,592	5,474	

Tabla 23. Continuación

Tratamiento	Promedio área hojas (cm ²)	Nº Hojas	Área Foliar (cm ²)	IAF	Media
T1	104,298	15	1564,47	4,010	4,926
	149,203	13	1939,639	4,972	
	109,162	8	873,296	2,238	
	222,041	12	2664,492	6,829	
	246,968	13	3210,584	8,229	
	163,764	10	1637,64	4,197	
	206,162	11	2267,782	5,813	
	158,116	13	2055,508	5,269	
	131,152	9	1180,368	3,025	
	152,124	12	1825,488	4,679	
T2	75,64	7	529,48	1,357	4,808
	195,04	13	2535,52	6,499	
	205,042	15	3075,63	7,883	
	133,151	10	1331,51	3,413	
	213,739	21	4488,519	11,505	
	89,899	9	809,091	2,074	
	128,489	11	1413,379	3,623	
	124,769	11	1372,459	3,518	
	159,511	10	1595,11	4,088	
	133,892	12	1606,704	4,118	
T3	86,364	7	604,548	1,550	4,953
	148,76	11	1636,36	4,194	
	118,582	12	1422,984	3,647	
	241,903	15	3628,545	9,300	
	222,119	13	2887,547	7,401	
	132,741	13	1725,633	4,423	
	125,443	11	1379,873	3,537	
	127,762	13	1660,906	4,257	
	128,944	13	1676,272	4,296	
	225,092	12	2701,104	6,923	

NOTA: Descripción de los resultados del índice de área foliar, Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Para el IAF los valores máximos se registraron en el tratamiento de control (Tc) y el dos (T2) siendo 12,554 y 11,505 en los ejemplares A1,5 y A3,5 respectivamente. El IAF promedio general (5,254) registrado a los 55 días fue ligeramente inferior al estudio realizado en lechuga Batavia (lechuga que forma cabeza) a los 61 días (6,78) (Carranza, Lanchero, Miranda, & Chaves, 2009); sin embargo, los valores máximos presentados en un estudio de lechuga de sistema cerrado (empleando una variedad de lechuga similar) para el día 45 (10,38) es inferior al obtenido en el presente a los 55 días (12,554), de modo que el índice indica un crecimiento moderado y dentro del rango común del cultivo (Reyes, Alvarez, Fraile, & Álvarez, 2017).

9.4.3. Análisis de covarianza ANOVA.

Las pruebas estadísticas de covarianza ANOVA, homogeneidad y HSD de Tukey se realizaron con el fin de aceptar o rechazar la hipótesis nula. Estas se realizaron mediante el programa estadístico informático IBM SPSS versión 19 y se presentan a continuación.

Tabla 24. Prueba de covarianza ANOVA para variables morfológicas.

Variable		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Longitud máxima de la raíz	Inter-grupos	531,317	3	177,106	4,039	,014
	Intra-grupos	1578,574	36	43,849		
	Total	2109,891	39			
Longitud del tallo	Inter-grupos	113,575	3	37,858	1,164	,337
	Intra-grupos	1170,925	36	32,526		
	Total	1284,500	39			
Ancho de la hoja	Inter-grupos	5,145	3	1,715	,255	,857
	Intra-grupos	242,434	36	6,734		
	Total	247,579	39			
Longitud de la hoja	Inter-grupos	19,383	3	6,461	1,990	,133
	Intra-grupos	116,895	36	3,247		
	Total	136,278	39			

NOTA: Descripción de resultados de la Prueba de covarianza ANOVA, Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Debido a que la prueba ANOVA presentó una significancia (Sig.) mayor al cinco por ciento ($p > 0,05$) para cada una de las variables de estudio, se acepta entonces la hipótesis nula, indicando que los datos cuentan con varianzas homogéneas o comportamientos similares a lo largo del monitoreo, es decir que considerada esta prueba no se presenta gran diferencia con respecto al efecto de los tratamientos sobre las variables que caracterizan el crecimiento.

Tabla 25. Prueba de homogeneidad de varianzas.

Variable	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Longitud máxima de la raíz	1,795	3	36	,166
Longitud del tallo	1,740	3	36	,176
Ancho de la hoja	,820	3	36	,492
Longitud de la hoja	1,244	3	36	,308

NOTA: Descripción de resultados de la Prueba de homogeneidad, Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020.

Al igual que en la prueba ANOVA, la homogeneidad de las varianzas presentó valores de significancia superiores al cinco por ciento, obteniendo el menor valor de significancia la variable de longitud de la raíz para ambas pruebas y ratificando la homogeneidad de los datos.

Tabla 26. Comparaciones múltiples HSD de Tukey.

Variable dependiente	(I) Tratamiento N°	(J) Tratamiento N°	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Longitud máxima de la raíz	Tc	1	9,70000*	2,96139	,012	1,7243	17,6757
		2	5,51000	2,96139	,263	-2,4657	13,4857
		3	2,29000	2,96139	,866	-5,6857	10,2657
	1	Tc	-9,70000*	2,96139	,012	-17,6757	-1,7243
		2	-4,19000	2,96139	,499	-12,1657	3,7857
		3	-7,41000	2,96139	,077	-15,3857	,5657
	2	Tc	-5,51000	2,96139	,263	-13,4857	2,4657
		1	4,19000	2,96139	,499	-3,7857	12,1657
		3	-3,22000	2,96139	,699	-11,1957	4,7557
	3	Tc	-2,29000	2,96139	,866	-10,2657	5,6857
		1	7,41000	2,96139	,077	-,5657	15,3857
		2	3,22000	2,96139	,699	-4,7557	11,1957
Ancho de la hoja	Tc	1	,88000	1,16054	,873	-2,2456	4,0056
		2	,37000	1,16054	,989	-2,7556	3,4956
		3	,01000	1,16054	1,000	-3,1156	3,1356
	1	Tc	-,88000	1,16054	,873	-4,0056	2,2456
		2	-,51000	1,16054	,971	-3,6356	2,6156
		3	-,87000	1,16054	,876	-3,9956	2,2556
	2	Tc	-,37000	1,16054	,989	-3,4956	2,7556
		1	,51000	1,16054	,971	-2,6156	3,6356
		3	-,36000	1,16054	,989	-3,4856	2,7656
	3	Tc	-,01000	1,16054	1,000	-3,1356	3,1156
		1	,87000	1,16054	,876	-2,2556	3,9956
		2	,36000	1,16054	,989	-2,7656	3,4856

Tabla 26. Continuación

Variable dependiente	(I) Tratamiento N°	(J) Tratamiento N°	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95 %	
						Límite inferior	Límite inferior
Longitud de la hoja	Tc	1	1,58000	,80586	,222	-,5904	3,7504
		2	1,45000	,80586	,290	-,7204	3,6204
		3	,28000	,80586	,985	-1,8904	2,4504
	1	Tc	-1,58000	,80586	,222	-3,7504	,5904
		2	-,13000	,80586	,998	-2,3004	2,0404
		3	-1,30000	,80586	,384	-3,4704	,8704
	2	Tc	-1,45000	,80586	,290	-3,6204	,7204
		1	,13000	,80586	,998	-2,0404	2,3004
		3	-1,17000	,80586	,476	-3,3404	1,0004
	3	Tc	-,28000	,80586	,985	-2,4504	1,8904
		1	1,30000	,80586	,384	-,8704	3,4704
		2	1,17000	,80586	,476	-1,0004	3,3404

NOTA: Descripción de resultados de las comparaciones múltiples HSD de Tukey, Por Laura. Avendaño, & Lusa Cortes, 2020

Finalmente, para el HSD de Tukey los valores de significancia superaron el 0,05 para las variables en cada tratamiento, a excepción de tratamiento de control (Tc) y el tratamiento uno (T1) que presentaron una significancia de 0,012 para la longitud de la raíz, esto indica una diferencia marcada entre las varianzas de los datos para los tratamientos en esta variable. Sin embargo, considerando el objeto de estudio, las variables relacionadas a la hoja presentaron significancias altas en cada una de las pruebas indicando una homogeneidad de los datos, de modo que los efectos de los diferentes sustratos son similares en el crecimiento de la planta y la distinción entre estos es baja.

10. Discusión de resultados

A lo largo del periodo de cultivo, monitoreo del sistema hidropónico, la generación de los resultados obtenidos y presentados anteriormente, se especula que un factor causal asociado a la variación generalizada en el índice de crecimiento (IC) para el ancho de las hojas de algunos individuos, comparándolos entre sí (los más favorables (T_c 0,365 cm/día) con los menos favorables (T_3 0,333 cm/día); pudo estar relacionado con factores microclimáticos en la etapa inicial del desarrollo de la planta, relacionados no solo con la confiabilidad de la semilla y su adaptación a clima cálido, sino además, relacionados con la cantidad de horas de captación lumínica diaria; dado que al posicionar el invernadero en un lote ubicado entre construcciones pudo presentarse en días poco soleados menor intensidad para los niveles bajos de la estructura.

Sin embargo, al confrontar los resultados obtenidos en reportes anteriores (Kim, y otros, 2019), (Salguero, 2015) y (Arcos, Benavides, & Rodríguez, Evaluación de dos sustratos y dos dosis de fertilización en condiciones hidropónicas bajo invernadero en Lechuga (*Lactuca Sativa* L.), 2010); donde hicieron uso de material inorgánico como sustrato, en condiciones similares a las recreadas, se tiene que a manera general para los tratamientos T_1 , T_2 y T_3 se obtuvieron dimensiones entre tres a ocho veces mejores respecto al largo, ancho de la hoja y la altura del tallo, es decir que a pesar de no generar mayor cantidad de hojas en la mayoría de los individuos, en este experimento se obtuvieron hojas más grandes y de buena calidad.

Debido al diseño del experimento, se descartan las especulaciones relacionadas a cambios producidos en las propiedades fisicoquímicas de la solución, debido al monitoreo constante realizado y la cubierta del invernadero que protegía las plantas de fenómenos microclimáticos como lluvias, afectaciones realizadas por animales, material orgánico (como hojas, ramas, frutos, semillas) y a la ausencia del uso de pesticidas en el manejo de las plagas.

11. Conclusiones

Dadas las variables de estudio, se identificó los tratamientos que presentaron ligeramente mejores resultados; el tratamiento de control o muestra blanca, obtuvo los valores medios más altos para el índice de área foliar, el índice de crecimiento tanto del largo como del ancho de hoja, la longitud final de la raíz, el ancho de hoja (junto a los tratamientos T2 y T3) y el número de hojas por planta, de modo que fue el tratamiento que en general presentó mejores estadísticas.

Por otro lado, el tratamiento dos (T2) obtuvo los valores medios más altos para la curva de fitomasa subterránea relacionada al tallo y raíces, el índice de crecimiento del tallo, la longitud final del tallo y el ancho de hoja (junto a los tratamientos TC y T3). Con respecto al tratamiento tres (T3), este presentó valores altos en las curvas de fitomasa área tanto para ancho como para largo de hoja, la longitud final y ancho de la hoja (junto al tratamiento de control).

De modo que, el tratamiento que registró un mejor efecto en el crecimiento de las hojas corresponde al tratamiento tres (T3); aquel que obtuvo un mejor efecto en el crecimiento de tallos y raíces corresponde al tratamiento dos (T2) y finalmente el que presentó valores medios constantes en todas las variables fue el tratamiento de control (TC).

Consideradas las mediciones obtenidas en el monitoreo, periodo de cosecha y las pruebas estadísticas (ANOVA, Levene y Tukey), se evidenció que las plantas presentaron datos de crecimiento con alto índice de homogeneidad entre tratamientos, de modo que el tratamiento de control y los experimentales, contaron con un comportamiento similar en cada nivel del montaje.

Sin embargo, aun cuando los tratamientos no ejercieron un efecto distintivo en las variables de crecimiento, en el PET como sustrato, los resultados de las variables alcanzaron valores óptimos sin presentar alguna afectación negativa (física o química) a la planta; además, funcionó al igual que otro tipo de sustrato inorgánico lo haría, de modo que aunque no presentó una mejor alternativa, si confirmó que puede ser implementado, cumpliendo con la estrategia de aprovechamiento del residuo dentro del sistema hidropónico bajo condiciones ideales.

Finalmente, el diseño en vertical del cultivo permitió obtener tanto un rendimiento óptimo de producción para un montaje pequeño ($0,878 \text{ Kg/m}^2$), como el aprovechamiento de 28,33 Kg de PET en este tipo de sistemas, el cual no se dispondría en un relleno sanitario.

12. Recomendaciones

De acuerdo a los resultados, experiencias, dificultades y observaciones obtenidas a lo largo del periodo de cultivo y monitoreo del sistema hidropónico, se proponen las siguientes recomendaciones.

- Realizar un mayor número de monitoreos destinados a la toma de mediciones (longitud, diámetro, altura, peso, ancho) para las variables morfológicas de las plantas de modo que se obtenga un mayor número de datos para la realización de las curvas de crecimiento.
- De ser posible, optar por la selección para el montaje una solución nutritiva líquida de origen orgánico, de modo que no sean necesarios insumos químicos adicionales.
- Realizar un estudio alterno que permita conocer cómo varía la composición nutritiva de las plantas y la incidencia de cada sustrato.
- De ser posible, gestionar equipos y materiales que faciliten los procesos de lavado y tamizaje iniciales de los sustratos seleccionados para su implementación del montaje, de modo que los procesos de limpieza y desinfección se puedan realizar en menor tiempo.
- Gestionar una mayor disponibilidad de los equipos, específicamente del multiparámetro, esto para llevar a cabo controles estrictos de las variaciones presentadas en la solución nutritiva para así mismo poder corregirla.

13. Referencias

- INIA. (2017). Manual de producción de lechuga. *Manual de producción de lechuga Boletín INIA N° 09* (pág. 150). Santiago de Chile: Instituto de Investigación Agropecuarias. <https://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/09%20Manual%20Lechuga.pdf>
- Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P. F., & Zepeda, F. (1997). *Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15925/diagnostico-de-la-situacion-del-manejo-de-residuos-solidos-municipales-en-america>
- ANDI. (2015). *Calidades de materiales para reciclaje*. Obtenido de Cámara de la industria de pulpa, papel y cartón: <http://www.andi.com.co/Uploads/CARTILLA%20DE%20CALIDADES%20DE%20MATERIALES%20PARA%20RECICLAJE.pdf>
- Arcos, B., Benavides, O., & Rodríguez, M. (2011). Evaluation of two substrates and two doses of fertilization under conditions hydroponics low hothouse in lettuce. *Revista de ciencias agrícolas*, 95-108. <https://revistas.udelar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/18>
- Atzori, G., Nissim, W. G., Caparrotta, S., Santantoni, F., & Masi, E. (2018). Seawater and water footprint in different cropping systems: A chicory (*Cichorium intybus* L.) case study. *Elsevier*, 172-177. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v211y2019icp172-177.html>
- Beltrano, J., & Giménez, D. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Buenos Aires: Universidad de la Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Brenes, L., & Jiménez, M. F. (2014). *Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistema NFT*. Obtenido de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6581/manual-hidroponia-NFT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cajo Curay, A. M. (2016). *Producción hidropónica de tres variedades de lechuga (Lactuca sativa L), bajo el sistema NFT con tres soluciones nutritivas*. Obtenido de Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/23421>

- Camacho, J. G. (2015). *Instituto tecnológico de Costa Rica*. Obtenido de Evaluación agronómica de cinco variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en tres ciclos de siembra consecutivos: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6469/evaluacion_agronomica_cinco_variedades_lechuga.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Carranza, C., Lanchero, O., Miranda, D., & Chaves, B. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) ‘Batavia’ cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 41-48. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/11330>
- Cibernnova. (2006). *Capítulo 10. Análisis de datos cuantitativos*. Obtenido de <https://ciberinnova.edu.co:10004/archivos/plantilla-ovas1-slide/documents-UCN-Canvas/proyecto-integrador-II/lecturas%20unidad%202/TEMA%201/Capitulo%2010-Sampierionlisis%20de%20datos%20cuantitativos%20270-335.pdf>
- CORPOAMOR. (2015). *Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS del municipio de Villavicencio Capítulos 1 y 2*. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente Villavicencio : <http://www.antigua.villavicencio.gov.co>
- Di Lorenzo, R., Pisciotto, A., Santamaria, P., & Scariot, V. (2013). From soil to soil-less in horticulture: quality and typicity. *Italian Journal of Agronomy* , 255-260. https://www.researchgate.net/publication/267845353_From_soil_to_soil-less_in_horticulture_Quality_and_typicity
- Durán , F. (2010). *Manual de cultivos hidropónicos*. Bogotá. Grupo Latino.
- FAO. (2015). *Perspectivas para el medio ambiente*. Obtenido de Agricultura y medio ambiente: <http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s11.htm>
- Forrest, M. (2016). *Recycling of polyethylene Terephthalate*. Shawbury: Smithers Group Company.
- Gandarillas , M. (2015). *Los plásticos que dañan la salud:El Bisfenol-A (o BPA)*. Obtenido de https://www.bioecoactual.com/wp-content/uploads/PDF2015/bioecoactual_septiembre_15_cas.pdf
- Gilsanz, J. C. (2007). *Hidroponía*. Montevideo : INIA Unidad de comunicación y transferencia de tecnología.
- Greenpeace. (2016). *Plástico en los océanos*. Obtenido de https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_océanos_LR.pdf

- Guerrero, E. M., Revelo, J. C., Benavides, O., Chaves, G., & Moncayo, C. Á. (2014). Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de pasto. *Revista de ciencias Agrícolas*, 3-16. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5104174.pdf>
- Hernandez, M., Casas, A., & Galvis, O. M. (1995). Análisis y estimación de parámetros e índices de crecimiento del árbol de Maraco (*Theobroma bicolor* H.B.K.) a primera floración. *Agronomía Colombiana*, 182 -191. <http://www.bdigital.unal.edu.co/24298/1/21442-73063-1-PB.pdf>
- Hunt, D. (2002). *Arquigráfico*. Obtenido de <https://arquigrafico.com/como-hacer-un-invernadero-casero/>
- IDEAM. (2010). *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2009). *Resumen sobre estudio de suelos en el departamento del Meta*. Colombia.
- Kim, H.-m., Lee, H.-r., Kim, Y.-j., Kim, H.-m., Lee, J.-h., Park, S., y otros. (2019). Selection of newly developed artificial medium for lettuce production in a closed-type plant production system. *Horticultural Science and Technology*, 708-718. <http://www.hst-j.org/articles/xml/jy9Y/>
- Londoño, C. L. (2006). Los recursos naturales y el medio ambiente en la economía de mercado. *Guillermo de Ockham*, 25-42. <https://www.redalyc.org/pdf/1053/105316847003.pdf>
- Lopez, N. (2009). *Propuesta de un programa para el manejo de los residuos sólidos en la plaza de mercado de Cerete Córdoba*. Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana: <https://javeriana.edu.co/biblos/tesis/eambientales/tesis64.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Guía ambiental para el sector plásticos*. Bogotá: Viceministerio de ambiente. <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guias-ambientales-sector-plasticos.pdf>

- Noreña, J. J., Aguilar, P. A., Espitia Malagón, E. M., Tamayo Molano, P. J., Argüello, O., & Arroyave, M. G. (2014). *Modelo tecnológico para el cultivo de lechuga en el Oriente Antioqueño*. Mosquera, Antioquia, Colombia: Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13758>
- Núcleo Ambiental S. A. S. (2015). *Manual Lechuga*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/14316>
- Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. (1996). *La empresa hidropónica a mediana escala*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/docrep/rlc1050s.pdf
- Olle, M., & Siomos, A. (2012). Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: A review. *Zemdirbyste*, 399-408. https://www.researchgate.net/publication/287868404_Vegetable_quality_and_productivity_as_influenced_by_growing_medium_A_review
- ONU. (2018). *El estado de los plásticos*. Obtenido de Perspectiva del día mundial del medio ambiente: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25513/state_plastics_WED_SP.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Ortega, L. D., Sánchez, J., Ocampo, J., Sandoval, E., Salcido, B. A., & Manzo, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 339-346. https://www.academia.edu/29126111/Efecto_de_diferentes_sustratos_en_crecimiento_y_rendimiento_de_tomate_Lycopersicum_esculentum_Mill_bajo_condiciones_de_invernadero
- Peacock, A. (2000). *Handbook of polyethylene: structures, properties, and applications*. Texas: Exxon Chemical Company. <https://www.routledge.com/Handbook-of-Polyethylene-Structures-Properties-and-Applications-1st/Peacock/p/book/9780824795467>
- Pennigfeld, F. (1983). Plant substrates for horticulture with special regard to Germany: A critical review. *Elsevier*, 269-281.
- PlasticsEurope. (2016). *An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Obtenido de <https://www.plasticseurope.org/application/files/4315/1310/4805/plastic-the-fact-2016.pdf>

- Reyes, A. J., Alvarez, J. G., Fraile, R. D., & Álvarez, O. F. (2017). Evaluation of the growth and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a closed recirculating hydroponic system. *Agronomía Colombiana*, 216-222. <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v35n2/0120-9965-agc-35-02-00216.pdf>
- Roca, D., & Martínez, P. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. *Editorial Universidad Nacional de Colombia*, 37-77. https://www.researchgate.net/publication/237100771_Sustratos_para_el_cultivo_sin_suelo_Materiales_propiedades_y_manejo
- Rodríguez, A. (2012). Advances of hydroponics in Latin America. *Acta horticulturae*, 23-32. https://www.researchgate.net/publication/283869323_Advances_of_hydroponics_in_Latin_America
- Salguero, E. M. (09 de 2015). *Efecto de sustratos y programas de fertilización sobre rendimiento y calidad de lechuga en cultivo hidropónico*. Obtenido de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2015/06/09/De%20Paz-Emerson.pdf>
- Superservicios . (2016). *Disposición final de residuos sólidos informe nacional*. Obtenido de <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/informenacional2016disposicionfinalderesiduossolidos1.pdf>
- Superservicios. (2017). *Informe Nacional de Aprovechamiento 2016*. Bogotá: República de Colombia. <https://www.superservicios.gov.co/sala-de-prensa/de-interes/informenacional-de-aprovechamiento-2016>
- Suvo, T., Jewel, M., Biswas, H., & Islam, M. (2016). Impact of substrate on soilless tomato cultivation. *International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology*, 82-86. <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-of-substrate-on-soilless-tomato-cultivation-Suvo-Biswas/f94a1037f0566e604a396234615bb215ed99fff2>
- Tehranifar, A., Arooei, H., Poostchi, M., & Nematti, H. (2007). Effects of seven substrates on qualitative characteristics of three strawberry cultivars under soilless culture. *Acta horticulturae*, 485-488. https://www.ishs.org/ishs-article/761_67
- Téllez, A. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: Una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/7080/1/905077.2012.pdf>
- Toro, J. S., & Porras, M. L. (2018). *Formulación de un plan de negocio para la fabricación de postes y mangueras a partir de la transformación del plástico recuperado*. Obtenido de Universidad Santo Tomas. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13716/2018juantoro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Universidad Autónoma de Nuevo León . (2015). *Aspectos de seguridad sobre el uso de los envases de plástico que están en contacto con los alimentos*. Obtenido de Secretaría de sustentabilidad: <http://sds.uanl.mx/seguridad-sobre-el-uso-de-los-envases-plasticos-que-estan-en-contacto-con-alimentos/>
- Universidad Nacional entre Ríos UNER. (02 de 2004). *Facultad de ciencias agropecuarias*. Obtenido de Unidad temática 7. Crecimiento: http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/fisiologiaveg/m_didactico/manual_practicas/ut7_04Ver4.pdf
- Urán, A. (2008). *Colombia - Un estado militarizado de competencia*. Kassel: Universidad Kassel. <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-369-4.volltext.frei.pdf>
- Vicéns, J., Herrarte, A., & Medina, E. (2005). *Análisis de la varianza ANOVA*. Obtenido de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54149687/anova.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DANALISIS_DE_LA_VARIANZA_ANOVA.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200316%2Fus-east-1%2Fs3%2Fa
- Zarta Ávila, P. (13 de 01 de 2018). *La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad*. Obtenido de Tabula Rasa: <http://www.scielo.org.co/pdf/tara/n28/1794-2489-tara-28-00409.pdf>