

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA  
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Estimación de las diferencias entre un sistema de riego por goteo con lámina de agua de riego fija y por lámina de agua requerida según las condiciones climáticas en función de la huella hídrica, producción, indicadores financieros y condiciones de humedad del suelo en el cultivo de lechuga en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

Federico Montero Ramírez

CARTAGO, 2020

Estimación de las diferencias entre un sistema de riego por goteo con lámina de agua de riego fija y por lámina de agua requerida según las condiciones climáticas en función de la huella hídrica, producción, indicadores financieros y condiciones de humedad del suelo en el cultivo de lechuga en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

Federico Montero Ramírez

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

---

Ing. Milton Solorzano Quintana

Asesor

---

Ing. Isabel Guzmán Arias. Ph.D.

Directora Escuela  
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA  
2020



## 1. Contenido

1. Contenido.....	iv
2. Índice de Figuras.....	x
3. Índice de Cuadros.....	xii
4. Índice de anexos.....	xiii
1.RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
2. INTRODUCCION.....	16
2.1 Planteamiento.....	17
2.2 OBJETIVOS.....	20
2.2.1 Objetivo General.....	21
2.2.2 Objetivos Específicos.....	21
3. REVISIÓN LITERARIA.....	22
3.1 Agricultura de precisión en riego.....	23
3.2 Riego por goteo.....	24
3.3 Descripción general del cultivo.....	26
3.3.1 Ciclo del Cultivo.....	26
3.3.2 Especie de lechuga.....	27
3.3.3 Profundidad radicular.....	27
3.4 Demandas del cultivo.....	27
3.4.1 Agua para el desarrollo de lechuga.....	27
3.4.2 Clima para el desarrollo.....	28
3.4.3 Suelo para cultivo de lechuga.....	28
3.4.4 Requerimientos Nutricionales.....	28

3.5 Velocidad de infiltración .....	29
3.6 Capacidad de campo (CC).....	29
3.7 Punto de marchitez permanente (PMP) .....	30
3.8 Densidad aparente.....	30
3.9 Evapotranspiración del cultivo .....	30
3.10 Evapotranspiración de referencia (ETo) o potencial (ETP) .....	31
3.11 Softwares para el cálculo de evapotranspiración (Climwat – Cropwat).....	32
3.13 Análisis Estadístico.....	32
3.14 Análisis económico.....	33
3.14.1 Valor Actual Neto (VAN) .....	33
3.14.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	34
3.15 Evaluación de impacto ambiental por medio de cálculo de huella hídrica.....	34
4. METODOLOGÍA.....	36
4.1 Caracterización del lugar de pruebas.....	37
4.2 Preparación del terreno.....	37
4.3 Diseño de sistema experimental .....	41
4.4 Instalación de sensores de medición.....	44
4.4.1 Calibración de equipo de medición .....	47
4.5 Diseño Agronómico.....	50
4.5.1 Estudio físico del suelo.....	50
4.5.1.1 Técnicas de muestreo de suelo .....	50
4.5.1.2 Textura.....	50
4.5.1.3 Profundidad efectiva.....	53
4.5.1.4 PAR (Porcentaje de área humedecida) .....	53
4.5.1.5 Cálculo de CC y PMP.....	54

4.5.1.6 Infiltración .....	54
4.5.1.7 Densidad aparente.....	55
4.5.2 Riego con Lámina fija .....	56
4.5.2.1 Lámina neta fija.....	56
4.5.2.2 Lámina neta real fija.....	57
4.5.2.3 Evapotranspiración real y potencial .....	57
4.5.2.4 Frecuencia de riego.....	57
4.5.2.5 Recálculo de la lámina neta.....	58
4.5.2.6 Eficiencia de riego.....	58
4.5.2.7 Lámina bruta para tratamiento de riego fijo .....	58
4.5.2.8 Tiempo de riego.....	59
4.5.3 Riego con Lámina requerida.....	59
4.5.3.1 Lámina neta requerida .....	59
4.5.3.2 Lámina neta real requerida .....	59
4.5.3.1 Evapotranspiración real y potencial .....	60
4.5.3.2 Frecuencia de riego y balance hídrico.....	60
4.5.3.3 Eficiencia de riego.....	61
4.5.3.4 Lámina bruta requerida.....	61
4.5.3.5 Tiempo de riego.....	61
4.5.3.6 Riego de cama control .....	61
4.5.4 Máximo número de operaciones.....	61
4.5.5 Caudal del sistema.....	61
4.5.6 Elección del gotero .....	62
4.5.7 Intensidad de aplicación .....	62
4.5.8 Estudio químico del suelo.....	62

4.6	Diseño hidráulico.....	63
4.6.1	Presión de operación.....	63
4.6.2	Diámetro de la tubería principal.....	63
4.6.3	Diámetro de la múltiple.....	64
4.7	Evaluación de impacto ambiental por medio de cálculo de huella hídrica.....	64
4.8	Análisis de producción y sensores.....	64
4.9	Mantenimiento del sistema de riego.....	66
4.10	Labores Agrícolas.....	66
4.11	Análisis económico.....	66
4.11.1	Cálculo de saldo anual.....	66
4.11.2	Cálculo de saldo acumulado en el año cero.....	67
4.11.3	Valor actual neto.....	67
4.11.4	Tasa Interna de Retorno.....	67
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	68
5.1	Diseño Agronómico.....	69
5.1.1	Estudio físico del suelo.....	69
5.1.1.1	Textura.....	69
5.1.1.2	Profundidad efectiva.....	69
5.1.1.3	PAR (Porcentaje de área humedecida) .....	69
5.1.1.4	Cálculo de CC y PMP.....	69
5.1.1.5	Infiltración .....	70
5.1.1.6	Densidad aparente.....	70
5.2	Estudio químico del suelo.....	70
5.3	Equipo de riego.....	71
5.4	Intensidad de aplicación .....	72

5.5	Diámetros del diseño hidráulico.....	72
5.6	Cálculos de riegos a aplicar .....	73
5.6.1	Riego con Lámina de agua fija.....	73
5.6.1.1	Lámina neta fija.....	73
5.6.1.2	Lámina neta real fija.....	73
5.6.1.3	Evapotranspiración real y potencial .....	73
5.6.1.4	Frecuencia de riego.....	73
5.6.1.5	Recálculo de la lámina neta.....	73
5.6.1.6	Eficiencia de riego.....	73
5.6.1.7	Lámina bruta para tratamiento de riego fijo .....	74
5.6.1.8	Tiempo de riego.....	74
5.7.1	Riego con Lámina de agua requerida .....	74
5.7.1.1	Lámina neta requerida, evapotranspiración potencial y evapotranspiración real .....	74
5.7.1.2.	Lámina neta real requerida.....	76
5.7.1.3	Eficiencia de riego.....	76
5.7.1.4	Lámina bruta requerida.....	76
5.7.1.5	Tiempo de riego en base a balance hídrico.....	77
5.8	Caudal del sistema.....	80
5.9	Evaluación de impacto ambiental por medio de cálculo de huella hídrica.....	82
5.10	Análisis de muestreo y sensores .....	84
5.11	Análisis económico.....	93
6.	CONCLUSIONES .....	95
7.	RECOMENDACIONES .....	97
8.	ANEXOS .....	99



9.BIBLIOGRAFIA..... 107

## 2. Índice de Figuras

Figura 1. Mapa nacional de la distribución de cultivo de Lechuga (Lactuca Sativa) Fuente: (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2015).....	18
Figura 2. Niveles de referencia para la programación de riego de precisión. Fuente: (Mounzer et al., s.f.) .....	24
Figura 3. Imagen ilustrativa de la Evapotranspiración. Fuente: (FAO, 2006) .....	31
Figura 4. Terreno Experimental antes de la mecanización. Fuente propia.....	38
Figura 5. Terreno experimental después del uso de chapeadora. Fuente propia. ....	39
Figura 6. Terreno experimental después del uso de rotador. Fuente propia.....	40
Figura 7. Camas terminadas para el diseño experimental. Fuente propia .....	41
Figura 8. Representación gráfica del diseño experimental. Fuente propia.....	42
Figura 9. Demarcación del origen de camas por medición con cinta métrica. Fuente propia .....	43
Figura 10. Diseño experimental concluido. Fuente propia.....	44
Figura 11. Watermark (sensor de tensión de agua en el suelo). Fuente: (“Irrrometer Sensors,” s.f.).....	44
Figura 12. Soilwatch 10 Pino - Tech (sensor de humedad). Fuente: (“SoilWatch 10 - Soil Moisture Sensor - PINO-TECH,” s.f.) .....	45
Figura 13. Área de experimentación delimitada con sensores enterrados. Fuente propia.....	46
Figura 14. Sensores de medición colocados en el terreno. Fuente propia.....	46
Figura 15. Mediciones de diferentes valores de humedad con los sensores Soilwatch 10. Fuente propia. ....	48
Figura 16. Muestras de suelo preparadas para la medición de humedad. Fuente propia. ....	48
Figura 17. Gráfico de curva de calibración para el sensor de humedad de suelo Soilwatch 10. Fuente propia. ....	49
Figura 18. Curva de calibración del sensor Watermark. Fuente propia. ....	50
Figura 19. Triángulo de texturas USDA. Fuente: (Hidr & INTA EEA San Juan Ing Agr Nicolás Ciancaglini-Prosap, s.f.) .....	52
Figura 20. Prueba de Bouyoucos. Fuente propia.....	52
Figura 21. Colocación Infiltrómetro Mini Disk. Fuente propia. ....	55
Figura 22. Tubería principal. Fuente Propia.....	63

Figura 23.Tubería múltiple. Fuente propia.....	72
Figura 24.Gráfico de lámina consumida por día. Fuente propia.....	75
Figura 25.Gráfico de consumo total de agua por tratamientos. Fuente propia.....	82
Figura 27.Gráfico de consumo diario de los tratamientos. Fuente propia.....	83
Figura 26.Gráfico de precipitaciones diarias. Fuente propia.....	83
Figura 28.Gráfico de sensores de humedad para la cama de control. Fuente propia. ....	86
Figura 29.Gráfico de mediciones de los sensores de humedad para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.....	87
Figura 30.Gráfico de mediciones de sensores de humedad para el tratamiento de lámina requerida. Fuente propia.....	87
Figura 31.Gráfico de comportamiento de sensores de humedad para la cama de control. Fuente propia.....	88
Figura 32.Gráfico de comportamiento de sensores de humedad para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.....	88
Figura 33.Gráfico de comportamiento de sensores de humedad para el tratamiento de riego requerida. Fuente propia.....	89
Figura 34.Porcentajes de humedad según tratamiento. Fuente propia. ....	90
Figura 35.. Gráfico de mediciones de sensores de tensión en la cama de control. Fuente propia.....	91
Figura 36.Gráfico de mediciones de sensores de tensión para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.....	91
Figura 37.Gráfico de mediciones de sensores de tensión para el tratamiento de lámina requerida. Fuente propia.....	92
Figura 38.Gráfico de mediciones de tensión según el tratamiento. Fuente propia.....	93

### 3. Índice de Cuadros

Cuadro 1. Valores de TR en función de la profundidad de raíces y textura del suelo. ....	25
Cuadro 2. Propiedades físicas del suelo. ....	29
Cuadro 3. Intervalos de medición de cada uno de los sensores. ....	45
Cuadro 4. Porcentaje del área de humedecida en el riego por goteo. Fuente:(Villalobos Araya, 2008).....	53
Cuadro 5. Porcentajes de textura para el suelo de práctica. ....	69
Cuadro 6. Valores de densidad obtenidos en pruebas de campo.....	70
Cuadro 7. Análisis químico de suelos primera parte.....	71
Cuadro 8. Análisis químico de suelos segunda parte. ....	71
Cuadro 9. Valores de evapotranspiración potencial y real. ....	74
Cuadro 10. Lámina bruta diaria. ....	76
Cuadro 11. Balance hídrico para cada uno de los días. ....	77
Cuadro 12. Tiempos de riego para riego de lámina requerida.....	79
Cuadro 13. Caudal utilizado por los tratamientos cada uno de los días. ....	80
Cuadro 14. Valores de análisis de varianza.....	84
Cuadro 15. Relaciones según la prueba de Tukey.....	85
Cuadro 16. Promedios de las variables medidas con diferencias significativas.....	85
Cuadro 17. Datos importantes para el análisis económico. ....	93
Cuadro 18. Resultados del análisis económico para el tratamiento de lámina requerida. Fuente propia.....	94
Cuadro 19. Resultados del análisis económico para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.....	94

#### **4. Índice de anexos**

Anexo 1. Valores de coeficiente de crecimiento. Fuente: (FAO, 2006).....	99
Anexo 2. Valores agotamiento y profundidad radicular. Fuente: (FAO, 2006).....	100
Anexo 3. Etapas de crecimiento. Fuente: (FAO, 2006).....	101
Anexo 4. Análisis químico completo de suelo (parte 1). Fuente propia. ....	102
Anexo 5. Análisis químico completo de suelo (parte 2). Fuente propia. ....	103
Anexo 6. Mediciones de variables de lechugas. Fuente propia.....	104

## **1.RESUMEN**

La producción del cultivo de lechuga (*lactuca sativa*) se ve afectada en gran forma por los déficits de agua y los excesos de riego, con el fin de encontrar una manera eficiente de riego se realizó un diseño experimental con propósito de evaluar la productividad de la lechuga variedad “capitata” en dos tratamientos, uno que utilizaba una lámina de agua fija y otro con una lámina de agua requerida calculada para los requerimientos hídricos en función de las condiciones climáticas. Se comprobó un ahorro considerable de agua en el tratamiento de lámina de agua requerida, así como un aumento en producción y por consecuente en su rentabilidad debido a que al considerar las condiciones climáticas se mejora el agua disponible para la planta en el suelo y se disminuyen los tiempos de riego.

**Palabras clave:** Goteo, huella hídrica, lechuga, evapotranspiración, rentabilidad.

## **ABSTRACT**

The lettuce (*lactuca sativa*) production is greatly affected by water deficits and irrigation excess, in order to find an efficient way of irrigation, an experimental design was carried out to evaluate the productivity of lettuce variety “capitate” in two treatments, one using a fixed water sheet and the other with a required water sheet calculated for the water requirements according to climatic conditions. Considerable water savings were found in the treatment with the required water sheet, as well as an increase in production and consequently in its profitability due to the fact that when climatic conditions are considered, the water available for the plant in the soil is better and irrigation times are reduced.

**Key words:** Drip, water footprint, lettuce, evapotranspiration, rentability.

## **2. INTRODUCCION**



## 2.1 Planteamiento

En 2019 Esther Kuisch Laroche, representante de la Oficina Multipaís de la UNESCO, advirtió que los altos niveles de escasez de recurso hídrico que ya experimentan muchos países del orbe seguirán aumentando a medida que crezca la demanda de agua y se intensifiquen los efectos del cambio climático (Katzy O`neal Coto, s.f.). La agricultura tiene gran responsabilidad de la situación que se afronta hoy en día, se proyecta que el 80% del consumo del agua en el mundo en el 2025 sea debido a dicho sector (Sivakumar, 2011).

La escasez de agua es un problema que aqueja al mundo y Costa Rica no es la excepción. Los cambios abruptos en las condiciones climáticas generan grandes pérdidas económicas al país, se calcula que para el 2009 solo en Costa Rica y en Nicaragua la sequía generó pérdidas de un 30% en las cosechas que es equivalente a una repercusión económica de USD 6,25 millones, ya que fueron afectadas 1200 ha de arroz (Calvo-Solano, Hidalgo, & Gotlieb, 2018), lo cual es un ejemplo de cómo el cambio climático va afectando el sector agropecuario. En las hortalizas estos cambios de clima repentinos pueden crear poca eficiencia y provocan que tecnologías como las de los sistemas de riego convencionales sean poco precisas, y que incluso puedan tener sobrestimaciones en la cantidad de lámina de riego que se utiliza; para combatir dichas problemáticas se busca maximizar la eficiencia en el uso del recurso hídrico.

En la provincia de Cartago, la producción de hortalizas es uno de los principales generadores de empleos directos e indirectos, según el Instituto de Desarrollo Rural (INDER) aproximadamente un 20% de los trabajadores se dedican al sector primario (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2015) que sin lugar a duda sigue siendo un sector muy importante para la provincia teniendo sólo en los cantones de Cartago, El Guarco, La Unión y Oreamuno donde se pueden contar más de 3000 fincas dedicadas al sector agropecuario siendo Cartago y Oreamuno los cantones con más fincas con 2119 y 600 respectivamente (Inder, 2016); las hortalizas son altamente explotadas en la zona, productos como la zanahoria o la lechuga hacen de la provincia una de las principales zonas productoras del país. Según el censo agropecuario del 2014 en solo en el cantón del Guarco se destinaron a la siembra de lechugas 277 ha aproximadamente siendo la zona con más alta producción del país.

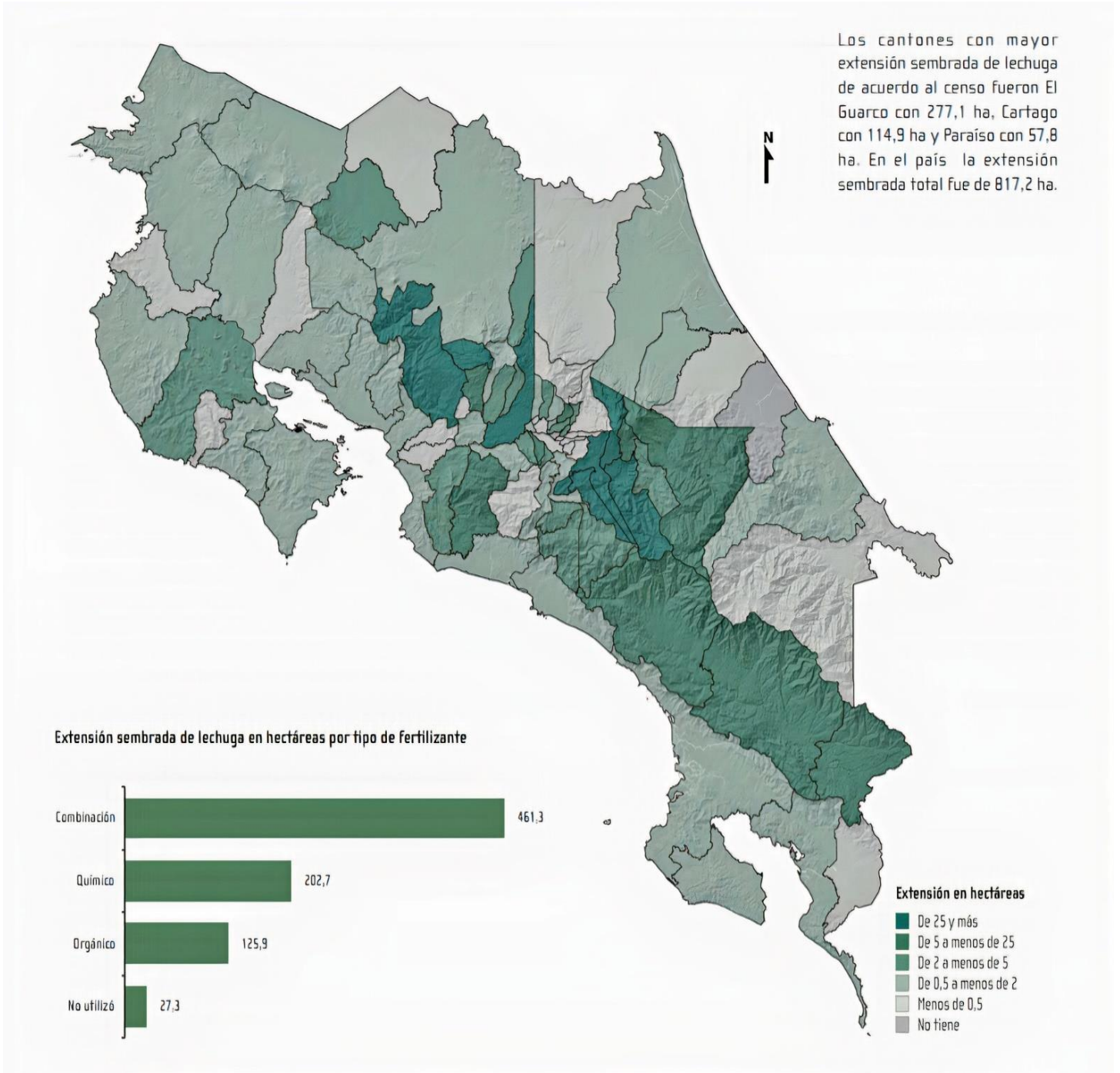


Figura 1. Mapa nacional de la distribución de cultivo de Lechuga (*Lactuca Sativa*) Fuente: (Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2015)

Dichos productos requieren de un gran consumo de agua por sus necesidades hídricas; por lo tanto, el uso de sistemas de riego se ha convertido en una herramienta indispensable para los productores. En la época seca, que prácticamente abarca un poco más de la mitad del año (un aproximado de 7 meses), la disponibilidad de agua se reduce en gran cantidad y más aún cuando se extiende por fenómenos como “El Niño”, por lo que muchas veces las producciones disminuyen y los agricultores incurren en gastos extra para tratar de compensar la falta de crecimiento en las plantas, cuando en realidad es un problema de falta de humedad constante que permita un crecimiento óptimo (Calvo-Solano et al., 2018). Por otra parte, cuando se encuentran en el periodo lluvioso, muchas veces se generan problemas de bacterias y hongos, en 2013 se declaró alerta nacional debido a el desarrollo de la Roya que se vio propiciado por el aumento de temperaturas y una alta humedad.

Los productores cada vez reducen más los márgenes de ganancias al utilizar productos químicos para combatir enfermedades o, como ya antes se mencionó, compensar déficits nutricionales. Por consiguiente, se vuelve importante encontrar una solución que pueda ser llevada a estos, de manera que haya un uso responsable del recurso hídrico, así como una mejora en la rentabilidad de la producción, para reducir pérdidas económicas que puedan afectar cientos de empleos a lo largo de la provincia de Cartago y de todo el país que dependen de dicha actividad (Inder, 2016).

Es necesario buscar entonces soluciones que mejoren las condiciones de trabajo de los agricultores de manera que haya una mejora de la producción de manera sostenible y para esto es necesaria la innovación con el uso de nuevas tecnologías. Según (González, s.f.) en informe para el banco mundial “Otro de los desafíos es guiar a las familias para que pasen de las prácticas agrícolas actuales a estrategias sostenibles, que mejoren la gestión de los recursos naturales y reduzcan la pobreza rural”. En la búsqueda del desarrollo de nuevas herramientas es necesario el apoyo tanto del sector público como privado donde ambas entidades funcionen como agentes de cambio en esta nueva era de producción agrícola que exige mucha más rentabilidad para que los agricultores puedan subsistir. La idea de la investigación es obtener conclusiones que sean beneficiosas que sirvan de insumo para el desarrollo de nuevas tecnologías para el sector agrícola y poder así propiciar una mejora sustancial en la forma en que se produce convencionalmente.

## **2.2 OBJETIVOS**

### **2.2.1 Objetivo General**

Estimar las diferencias entre un sistema de riego por goteo con lámina de riego fija y por lámina requerida según las condiciones climáticas en función de la huella hídrica, producción, indicadores financieros y condiciones de humedad del suelo en el cultivo de lechuga (*lactuca sativa*) en la escuela de ingeniería agrícola del ITCR, Cartago.

### **2.2.2 Objetivos Específicos**

1. Estimar la huella hídrica de los tratamientos de riego por lámina de agua de riego fija y lámina de agua de riego requerida según las condiciones climáticas para el cultivo de lechuga (*lactuca sativa*).
2. Establecer las diferencias significativas de las variables fisiológicas de la producción de lechuga (*lactuca sativa*) en función de los tratamientos de riego por lámina de agua de riego fija y lámina de agua de riego requerida según las condiciones climáticas.
3. Comparar los indicadores financieros proyectados a partir de la producción de lechuga (*lactuca sativa*) en función de los tratamientos de riego por lámina de agua de riego fija y lámina de agua de riego requerida según las condiciones climáticas.
4. Comparar los comportamientos del porcentaje de humedad gravimétrica y el potencial mátrico del contenido de humedad del suelo en función de los tratamientos de riego por lámina de agua de riego fija y lámina de agua de riego requerida según las condiciones climáticas.

### **3. REVISIÓN LITERARIA**

### **3.1 Agricultura de precisión en riego**

La agricultura de precisión se define como “efectuar la intervención correcta, en el momento adecuado y en el lugar preciso” según lo explica Gil (2016) en su proyecto. Por lo que el riego pasa a formar parte de este concepto al aplicar las cantidades exactas según los cambios que se den en tiempo real. Será importante en la reducción de costos y en la mejora de las ganancias aproximar un riego adecuado.

“Cuando se cubren las necesidades hídricas de la planta, el cultivo se nutre adecuadamente, crece en buenas condiciones, y produce altos rendimientos. En caso contrario puede apreciarse el impacto negativo sobre la calidad y la cantidad de producción. Así, el agricultor tiene que estar pendiente de planificar y tomar decisiones sobre la dosis y la frecuencia de riego necesaria para cubrir las necesidades hídricas de la planta antes y durante todo el ciclo de cada cultivo en su finca. La precisión de esta tarea llamada “Programación de riego” depende de la experiencia del agricultor y de su capacidad de percibir las relaciones hídricas entre el agua, el suelo, la planta y la atmósfera, y es necesario poder estimar el déficit actual de agua en el suelo” (Mounzer, Montes, Baviera, Pedrero, & Alarcón, s.f.).

“El conocimiento de áreas uniformes en propiedades físicas y el uso de modelos computacionales permitirán un mejor manejo del recurso hídrico con un aumento de la eficiencia de uso del agua y de fertilizantes nitrogenados, lo que a su vez protegerá las aguas subterráneas de contaminantes” (Chartuni, Carvalho, Marçal, & Ruz, 2007).

Una vez definida la importancia de un riego preciso se pueden definir aplicaciones de tecnologías para realizarlo de la manera más eficiente posible. Para estimar los riegos es común en la actualidad el uso de sensores que determinan el contenido de humedad de manera directa o indirecta, definiendo según el tipo de cultivo y suelo el rango óptimo para aplicar el riego, en la siguiente imagen se muestra en la figura una forma de utilizar valores humedad donde se define el nivel de agotamiento dependiendo de las características específicas para así utilizar el riego en el momento que los valores de nivel de agotamiento sean los permisibles.

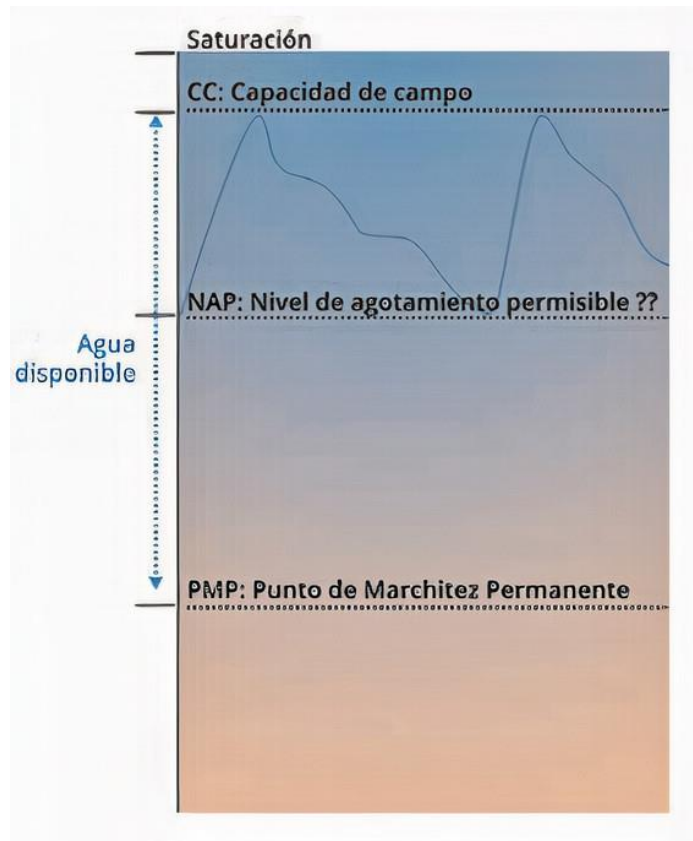


Figura 2. Niveles de referencia para la programación de riego de precisión. Fuente: (Mounzer et al., s.f.)

La optimización de la aplicación del sistema de riego representa a mediano plazo una mayor rentabilidad y un ahorro considerable de agua que reducirá problemas ambientales en la disponibilidad del recurso, así como evitar problemas de erosión y percolación que hagan que se vean afectados los mantos acuíferos con fertilizantes nitrogenados, por ejemplo. (Enciso, Porter, & Périès, s.f.)

### 3.2 Riego por goteo

El riego por goteo es la aplicación de agua calculada al suelo por medio de emisores o goteros. El riego por goteo cuenta con la gran diferencia de humedecer solo una parte del suelo a diferencia de los otros sistemas de riego (Villalobos Araya, 2001). El riego por goteo presenta altos niveles de eficiencia que rondan del 90 % al 95 %, como gran ventaja este tipo



de riego se puede utilizar en la mayoría de terreno sin necesidad de realizar una nivelación (Ministerio de Agricultura, 2013).

Para calcular la eficiencia de un sistema de riego por goteo se debe asumir un coeficiente de uniformidad entre 100% y 90% (Villalobos, 2018). Por otra parte, se debe escoger una relación de transpiración (TR), la cual es la relación entre el agua necesaria y el agua que se aplica. La TR está en función de la profundidad de raíces y textura del suelo, como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Valores de TR en función de la profundidad de raíces y textura del suelo.

PROFUNDIDAD RAÍCES (m)	TEXTURA			
	Muy arenosa	Arenosa	Media	Fina
< de 0,75	0,90	0,90	0,95	1,00
De 0,75 a 1,50	0,90	0,95	1,00	1,00
> de 1,50	0,95	1,00	1,00	1,00

Fuente: (Villalobos Araya, 2008)

Algunas ventajas y limitaciones del riego según Angeles et al. (2002) y Liotta (2015):

#### Ventajas

- a) Bajas dosis de aplicación que se trasladan a ahorro económico en recurso hídrico como en la eficiencia del tiempo de vida de los diferentes componentes de riego (válvulas, filtros, etc.) que están diseñados para menores caudales y por lo tanto su desgaste es menor.
- b) Uniformidad del riego que hace mucho más eficiente la aplicación de sales minerales de fertirriego y el del consumo energético.
- c) Mejora el control de malezas debido a que el riego es localizado y permite generar la humedad necesaria para las plantas en cultivo, sin regar zonas que puedan generar malezas innecesarias.
- d) Mejor control fitosanitario, al poder aplicar de manera más efectiva los químicos necesarios para el control de enfermedades.

- e) Ahorro en mano de obra y energía al necesitar menos control de malezas y además una menor presión para su operación.
- f) Mejora la calidad del producto final al mantener la humedad óptima en el suelo durante todo el periodo del cultivo.

#### Limitaciones

- a) Los emisores se obstruyen más fácilmente por lo que se recomienda revisar constantemente el correcto funcionamiento.
- b) El costo inicial es un poco más elevado que el resto de los sistemas, tanto en materia prima como en mano de obra ya que su instalación así lo demanda, además de tener que hacer movimientos del sistema cada vez que se pretenda usar maquinaria en el terreno.
- c) A diferencia del riego por gravedad necesita un poco más de energía para su funcionamiento por lo que es necesario el uso de una bomba para proporcionar una óptima presión de operación.

### **3.3 Descripción general del cultivo**

#### **3.3.1 Ciclo del Cultivo**

El ciclo de la lechuga es relativamente corto puesto que consta de aproximadamente de 6 semanas a 8 semanas. Este ciclo va desde su siembra hasta el momento de la cosecha, el tiempo dependerá de la variedad de la lechuga, del lugar de la siembra y de las condiciones tanto del suelo como meteorológicas.

El uso de semillero (almácigo) es muy común, este proceso acorta en una semana o dos semanas el ciclo de la lechuga, generalmente se acostumbra a ser sembrada en campo

abierto, ambientes protegidos, en bancas o en bancas hidropónicas (Theodoracopoulos, Lardizabal, & Arias, 2009).

### **3.3.2 Especie de lechuga**

Existen diferentes variedades del cultivo como lo son la de *Lactuca sativa* L. var. *crispa* y la de *Lactuca sativa* L. var. *Capitata*, se cultivan en gran cantidad debido a su disponibilidad en el mercado además que son las variedades que mejor se adaptan a la zona por experiencia de siembras anteriores (Alfaro Santamaría, 2011). Cabe destacar que la variedad *crispa* se desarrolla en un ciclo más prolongado que el resto puesto que su ciclo puede llegar hasta los 100 días de desarrollo, la variedad *capitata* en cambio consta de un ciclo de aproximadamente 70 días.

### **3.3.3 Profundidad radicular**

Según la FAO la profundidad radicular de la lechuga llega a profundidades máximas de 30 cm a 50 cm, sin embargo, según diversos estudios la profundidad de la raíz llega a máximo 25 cm en la mayoría de los casos, por lo que será esencial trabajar en una profundidad de aproximadamente 20 cm que es la zona donde se concentra la mayor parte, cabe destacar que la raíz es de tipo pivotante y tiene ramificaciones (FAO, 2006).

## **3.4 Demandas del cultivo**

### **3.4.1 Agua para el desarrollo de lechuga**

El agua es fundamental para el óptimo desarrollo de las hojas y obtener al final del proceso una producción esperada. Al igual puede ser sumamente perjudicial la aplicación de agua en exceso que sobrepase los niveles de humedad que se requieran.

Según la teoría se requieren precipitaciones que van desde los 1200 a 1500 mm anuales, donde se requieren principalmente 250 a 350 mm en su periodo vegetativo (Theodoracopoulos et al., 2009).

Para un adecuado manejo del agua se recomienda el uso de sistemas de riego, en este caso la precisión será esencial por lo que es recomendado el uso de riego por goteo para evitar excesos cómo lo podría causar el riego por aspersión que es poco eficiente.

La humedad es factor importante en el desarrollo de la lechuga, necesita estar bien humedecida, se recomienda mínimo humedecer hasta el punto capacidad de campo y mantener siempre el nivel de humedad para un óptimo desarrollo sin tener fluctuaciones drásticas debido a que pueden dañar la raíz, con respecto a la humedad relativa es importante monitorear constantemente puesto que un exceso de esta propicia el desarrollo de plagas y de enfermedades. Las raíces de la lechuga son pequeñas en comparación con el resto del cuerpo por lo que es bastante sensible a la falta de humedad y no resiste ni siquiera pequeñas sequías. Se recomienda según la literatura un porcentaje de 60 a 80 como máximo en su humedad relativa (Saavedra Del R et al., 2017).

### **3.4.2 Clima para el desarrollo**

La lechuga presenta gran adaptabilidad a los diferentes climas, se desarrolla fácilmente de los 1800 m.s.n.m a los 2800 m.s.n.m. Se desarrolla mejor en una temperatura que oscila entre los 15° C a los 20° C, sin embargo, puede vivir a temperaturas bajas hasta los 6° C aunque no es recomendable mantener temperaturas tan bajas debido a que puede ocasionar lesiones principalmente foliares además de no desarrollar raíces por debajo de los 5° C (Alfaro Santamaría, 2011). Es sumamente intolerante a las temperaturas altas que le restan humedad para su desarrollo y puede ocasionar marchitez, y en fases avanzadas causa la emisión excesiva de tallos y flores que no es deseada en la lechuga.

### **3.4.3 Suelo para cultivo de lechuga**

El suelo ocupará un lugar muy importante en la producción de la lechuga y aunque el cultivo se adapta a casi todos los tipos de suelos, se necesita un buen drenaje y que sea un suelo de buena retención de humedad por lo que suelos de textura media serán los ideales debido a que los suelos pesados pueden ocasionar problemas de encharcamiento y con eso se pueden ocasionar diferentes enfermedades por exceso de humedad. Se recomiendan suelos con buena fertilidad y ricos en materia orgánica que generen óptimas condiciones físicas y químicas.

### **3.4.4 Requerimientos Nutricionales**

Será fundamental para el crecimiento de toda la planta principalmente en las primeras etapas disponer de nitrógeno y suficiente fósforo para no limitar a la planta, según estudios

otro elemento importante que se debe incluir es el potasio, estos tres elementos presentan gran movilidad en el suelo por lo que serán sumamente importantes para la planta, claro está que su aplicación en exceso podría ocasionar problemas por lo que se recomienda un estudio previo (Saavedra Del R et al., 2017).

### 3.5 Velocidad de infiltración

Cuando el agua de la precipitación o del riego penetra el suelo vertical y horizontalmente debido a la gravedad es conocido como infiltración (López, 2011).

La cantidad del agua que se aplica en el suelo para riego, depende tanto de la textura como de parámetros hidráulicos como la velocidad de infiltración del agua en suelo la cual no puede estar excedida por la intensidad de aplicación, cómo lo define Vasquez et al., (2017) .

En el cuadro 2 se puede observar los valores representativos de densidad aparente (Dap), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y velocidad de infiltración para las diferentes clases texturales.

Cuadro 2. Propiedades físicas del suelo.

<b>Textura del suelo</b>	<b>Peso específico aparente (g/cc)</b>	<b>CC base suelo seco (%)</b>	<b>PMP base suelo seco (%)</b>	<b>Velocidad de infiltración(mm/h)</b>
<b>Arenoso</b>	1,55-1,80	6-12	1-6	25-50
<b>Franco arenoso</b>	1,40-1,60	10-18	4-8	13-76
<b>Franco</b>	1,35-1,50	18-26	8-12	8-20
<b>Franco arcilloso</b>	1,30-1,40	23-31	11-15	2-15
<b>Arcilloso arenoso</b>	1,25-1,35	27-35	13-17	0,3-5
<b>Arcilloso</b>	1,20-1,30	31-39	15-19	1-5

Fuente: (Villalobos Araya & Valverde Conejo, 2016)

### 3.6 Capacidad de campo (CC)

“Se define como capacidad de campo a la máxima capacidad de retención de agua de un suelo sin problemas de drenaje, y que se alcanza según la textura del suelo entre las 6 y 72 horas después de un riego pesado o una lluvia que permitió saturar momentáneamente al

suelo. Es decir, cuando la percolación o drenaje del agua gravitacional haya, prácticamente, cesado” (Vasquez et al., 2017). Por su parte Lanfranco, Pellegrini, & Cattani (2014) definen la capacidad de campo como el contenido de agua en el suelo después de 48 horas de un riego o de una lluvia abundante, luego de ese tiempo se supone que empieza un drenaje lento del agua contenida en el suelo.

### **3.7 Punto de marchitez permanente (PMP)**

La teoría dice que es el contenido de humedad donde las plantas muestran síntomas de marchitamiento irreversibles, esto se da debido al fluido lento del agua que será cercano a los 15 bares a nivel energético (Vasquez et al., 2017)

Lanfranco et al (2014) mencionan que el punto de marchitez permanente es valor de significado fisiológico, y el valor común de la succión matricial, es decir, cuando la succión es total en el suelo salino, que se considera limitante para el crecimiento y supervivencia de las plantas, es de 150000 kPa.

### **3.8 Densidad aparente**

La densidad del suelo es la relación que existe entre la masa del suelo y el volumen de sólidos del suelo. Es de gran importancia para calcular la porosidad del suelo y por ende poder tener una idea del comportamiento suelo - agua – planta (Alvarado & Forsythe, s.f.). En Costa Rica los estudios realizados indican que las densidades de suelos de origen volcánico es 0,95 a 1,20 (Alvarado & Forsythe, s.f.).

### **3.9 Evapotranspiración del cultivo**

Según (FAO, 2006) “Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo”.

La evaporación se ve directamente afectada por la radiación solar, la latitud, estación del año, hora del día y nubosidad. La evapotranspiración entonces será un conjunto de lo transpirado del cultivo, así como lo evaporado del suelo.

### 3.10 Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) o potencial (ETP)

La Eto establece una relación que permite calcular la evapotranspiración por medio de datos meteorológicos, es la llamada evapotranspiración potencial y será la base para calcular evapotranspiración según la etapa de desarrollo. La ETO es fácil de calcular con variables climáticas, con métodos indirectos, en Costa Rica los más fáciles de encontrar son: Blanney-Criddle, hargreaves y Thornthwaite; también se usan programas informáticos como el CROPWAT de la FAO que se basa en la fórmula de Penman-Montein.(Valverde & Villalobos, 2016).

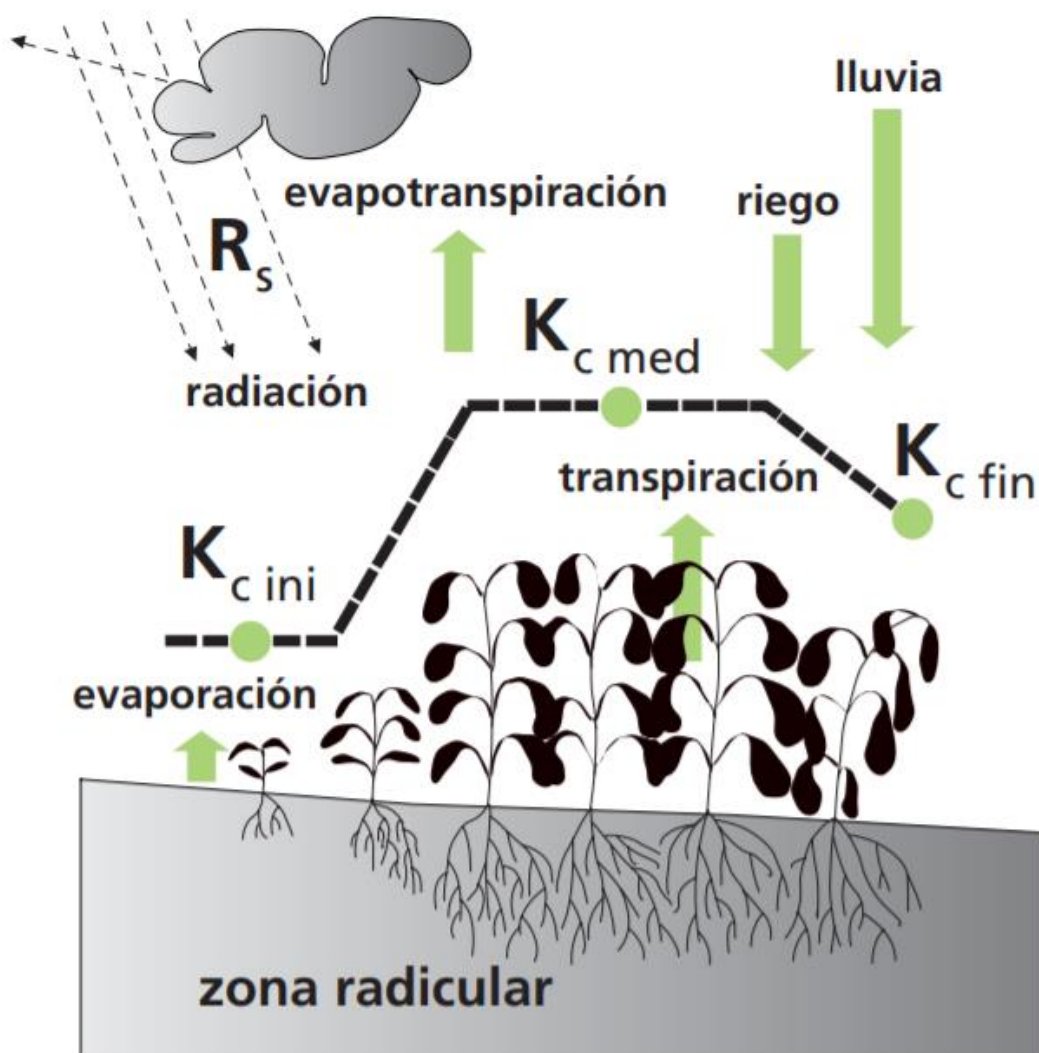


Figura 3. Imagen ilustrativa de la Evapotranspiración. Fuente: (FAO, 2006)

### **3.11 Softwares para el cálculo de evapotranspiración (Climwat – Cropwat)**

Climwat es una base de datos climáticos que se utiliza en conjunto con el software Cropwat que es utilizado para obtener los requerimientos hídricos de la planta, además maneja la opción de obtener tiempos de riego, así como la opción de proporcionar un calendario de riego según las necesidades de cada cultivo. El Climwat se encarga de recopilar los datos climáticos necesarios para obtener la evapotranspiración potencial por medio del método de Penman Monteith (“CLIMWAT - Climatic Database to be used with CROPWAT | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations,” s.f.).

### **3.12 Diseño de bloques completo al azar**

El diseño de bloques completos al azar surge por la necesidad que tiene el investigador de ejercer un control local de la variación dado la existencia de un material homogéneo (*Diseños en bloques completos al azar*, s.f.). Los pasos para formar un diseño de bloques experimentales son:

- a) Formar los bloques de unidades experimentales, según el criterio de agrupamiento que se quiera asignar.
- b) Se asignan los tratamientos al azar.

En Costa Rica los experimentos de campo son efectuados en su mayor con diseños de bloques al azar (Navarro & Vargas, 2015).

### **3.13 Análisis Estadístico**

#### **ANOVA**

El análisis de varianza (ANOVA) es utilizado para comparar una variable cuantitativa de diferentes grupos (Bakieva, Such, & Jornet, 2010), esta prueba contrasta las medias de variables independientes. Se puede determinar entonces si la variable evaluada presenta



diferencias significativas o no. Según (Antonio et al., sf.) se necesitan varios aspectos para poder aplicar la metodología:

- a) Independencia: los individuos estudiados han de ser independientes unos de otros.
- b) Aleatoriedad: las muestras o grupos objeto de estudio deben haberse obtenido de forma aleatoria.
- c) Normalidad: las muestras o grupos analizados deben seguir una distribución Normal.
- d) Homocedasticidad: debe haber igualdad de varianzas en las muestras o grupos estudiados.

### **Prueba de Tukey**

Es una comprobación estadística utilizada para comparar medias de tratamientos por medio de una diferencia única, la prueba dependerá del número de comparaciones que se hagan al igual que en otras pruebas estadísticas (Fors, 2014). Es uno de los métodos más utilizados por los estadísticos y se considera un perfecto complemento para el análisis de varianzas, de esta manera se puede saber con precisión en cuál tratamiento puede estar la diferencia que modifica la media.

### **3.14 Análisis económico**

Es una parte fundamental para tomar decisiones de inversión. Por medio del análisis de indicadores se puede determinar la factibilidad de una posible inversión.

#### **3.14.1 Valor Actual Neto (VAN)**

Es un indicador financiero que permite calcular el valor presente del flujo de ingresos a futuro, con dicho valor se puede saber si un proyecto es viable o no (Muñoz, s.f.). Los criterios para utilizar son los siguientes:

- ✓ Si el  $VAN > 0$ : El valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios.

- ✓ Si el  $VAN=0$ : El proyecto de inversión no generará ni beneficios ni pérdidas, siendo su realización, en principio indiferente.
- ✓ Si el  $VAN < 0$ : El proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

### **3.14.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)**

Según Muñoz “La TIR es una herramienta de toma de decisiones de inversión utilizada para comparar la factibilidad de diferentes opciones de inversión. Generalmente, la opción de inversión con la TIR más alta es la preferida.”

Los criterios de análisis son los siguientes (Mete, 2014)

La TIR se analiza de la siguiente manera:

$TIR > K$   $VAN > 0$ : Se elige el proyecto

$TIR < K$   $VAN < 0$ : No se elige el proyecto

$TIR = K$   $VAN = 0$ : No se elige el proyecto

Siendo K la tasa de interés elegida.

### **3.15 Evaluación de impacto ambiental por medio de cálculo de huella hídrica**

La FAO menciona que la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es una herramienta que identifica los posibles impactos ambientales de los proyectos propuestos, con el objetivo principal de tomar las medidas adecuadas de prevención, mitigación, gestión y monitoreo.

En palabras de Erias & Alvarez (2008) “La evaluación ambiental, un instrumento genérico cuyos objetivos son anticipar los resultados posibles derivados de acciones previstas y tomar las mejores decisiones correspondientes a los mismos, estaría configurado por dos instrumentos específicos primarios: la evaluación de impacto ambiental (EIA), que tiene como objetivo actual evaluar la repercusión de proyectos de obras, instalaciones o actividades sobre el medio ambiente; y la evaluación ambiental estratégica (EAE), que tiene como objetivo evaluar la repercusión de programas, planes o políticas sobre el medio ambiente”.

“De forma muy simplificada, la Huella Hídrica (HH) es un indicador del consumo y contaminación de agua dulce, que contempla las dimensiones directa e indirecta. Su concepto fue introducido por primera vez en año 2002 por el Dr. Arjen Hoekstra y desde entonces es difundido por la organización Water Footprint Network ” (*Manual para la evaluación de huella hídrica*, 2002).

## **4. METODOLOGÍA**

#### **4.1 Caracterización del lugar de pruebas**

La modelación del diseño experimental fue realizada en la Escuela de Ingeniería Agrícola en el campo de pruebas al aire libre en la sede central del ITCR en el cantón central de Cartago. Aproximadamente a 1360 msnm en el campo de prácticas. Se utilizó un aproximado de 82 m<sup>2</sup> para poder asegurar el correcto uso del espacio y asegurar así la mejor distribución en las pruebas. Dichas pruebas fueron realizadas en el cultivo de Lechuga (*Lactuca Sativa*) de la especie capitata debido a su conocida nivel de adaptación en la zona.

El campo tiene acceso a recurso hídrico mediante una tubería principal de 1" (50 mm) en PVC, la cual cuenta con un reductor de presión para asegurar una presión máxima en la tubería, cabe destacar que se hicieron pruebas para asegurar que efectivamente se tuviera una presión óptima de operación.

#### **4.2 Preparación del terreno**

Para la preparación del terreno se implementó el uso de rotador para asimilar lo mejor posible las condiciones de trabajo de los agricultores de legumbres de la zona ya que se realizaron visitas de campo para coleccionar información acerca de las prácticas agrícolas utilizadas. Se utilizó la chapeadora para remover gran parte del material orgánico que tenía el terreno para luego poder utilizar el rotador y así incorporarla.

En las Figuras 4 y 5 se muestran los resultados de los pasos mencionados de manera consecutiva en la metodología para lograr preparar el lugar de las pruebas de la manera más adecuada. En la primera figura se muestra el estado del terreno antes de realizar las labores correspondientes.

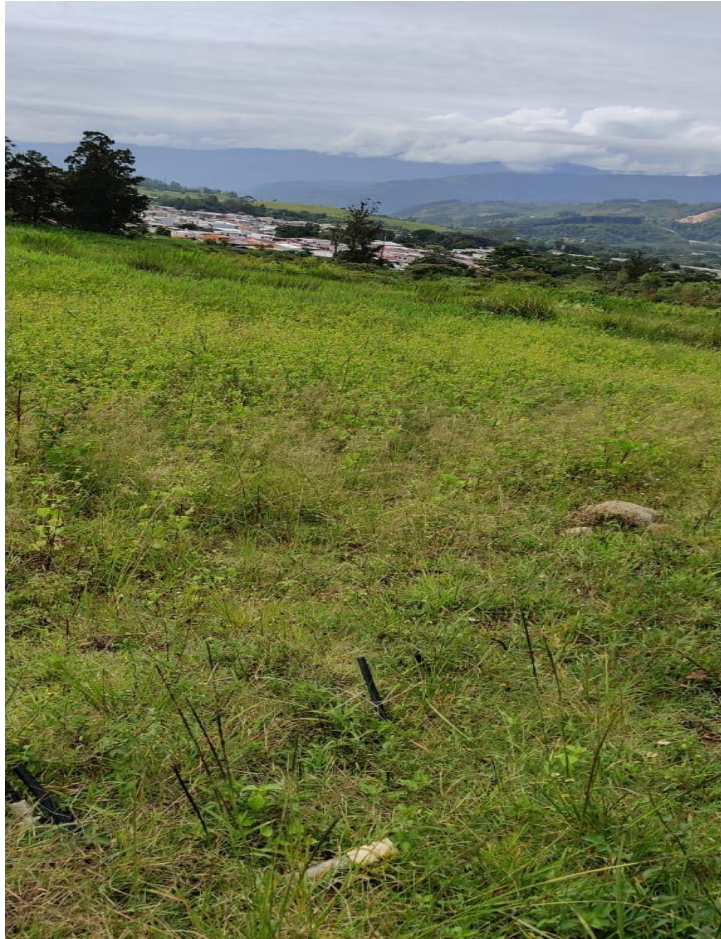


Figura 4. Terreno Experimental antes de la mecanización.  
Fuente propia.

Tal como se muestra se puede apreciar la gran cantidad de hierba no deseada que pudo ser hospedero de plagas que afectarían al cultivo en la prueba por lo que se optó por utilizar maquinaria para mecanización primaria como lo fue la cortadora de cadenas al examinar el lugar y verificar el tipo de hierba que se presentaba en el lugar y así poder obtener los resultados requeridos.

En la Figura 5 se puede observar el resultado de la aplicación de la chapeadora con cadenas donde fue removido el grueso de la mala hierba quedando un poco de residuo que se incorporaría más adelante al terreno por medio de la utilización del rotador.



Figura 5. Terreno experimental después del uso de chapeadora.  
Fuente propia.

La utilización del rotador fue necesario debido a la necesidad de descompactar la capa superficial del suelo para el correcto desarrollo de las plantas, el rotador fue aplicado a la parte donde se realizó la siembra, sin embargo, para evitar problemas de crecimiento de malezas y propagación de plagas se decidió rotar un perímetro considerable de aproximadamente 1 metro alrededor. En la Figura 6 se muestra el resultado del proceso explicado.



Figura 6. Terreno experimental después del uso de rotador.  
Fuente propia.

Una vez mecanizado el terreno se procedió a realizar el trabajo de la confección de las camas hechas a 1 metro de ancho aproximadamente por 6 metros de largo por medio de la utilización de monocultor y de herramientas de uso convencional como lo es la azada y la pala para realizar los desagües y sus límites.

Como última etapa de la preparación se utilizó una bomba fumigadora mecánica para utilización la quema de mala hierba por medio de herbicida sistémico que quedara en las camas y en las orillas para evitar posibles problemas de plagas por hospederos que se pudieran presentar en un futuro. También se utilizó la bomba para aplicar un insecticida que ayudara con las posibles plagas de insectos del lugar como lo fueron las hormigas que se observaron durante la preparación del terreno, como punto importante se dejó luego reposar el terreno durante 10 días antes de la siembra para evitar tener repercusiones secundarias por residuos del herbicida.



En la Figura 7 se observan las camas ya confeccionadas con el monocultor que fue utilizado debido a la facilidad que brinda para ser movilizado hasta la zona.

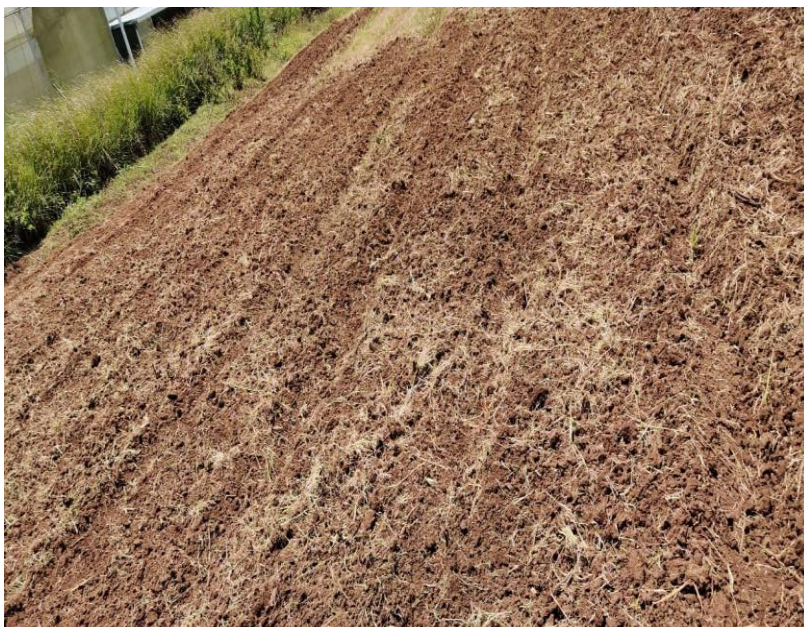


Figura 7. Camas terminadas para el diseño experimental. Fuente propia

### **4.3 Diseño de sistema experimental**

Se realizó un diseño experimental de bloques aleatorios donde definimos dos tratamientos diferenciados más una cama de control, los tratamientos definidos fueron:

- a) Riego por goteo con lámina fija
- b) Riego por goteo con lámina requerida
- c) Testigo sin riego

Cada tratamiento tiene 3 repeticiones y un aproximado de 112 lechugas evaluables por cama, debido a que aproximadamente se sembraron 144 lechugas por cama, pero se contemplaron plantas extra que ayudaran a reducir el efecto borde que suele presentarse en las pruebas. Como el método lo indica la distribución de los tratamientos fue realizada aleatoriamente de manera que cada bloque de tres camas tuviera una colocación con la menor influencia en los resultados posibles. En la Figura 8 se muestra la distribución de los bloques realizada con sus respectivas medidas. Por cuestiones de logística la cama testigo no puede ir en el centro por el riego que se va a implementar.

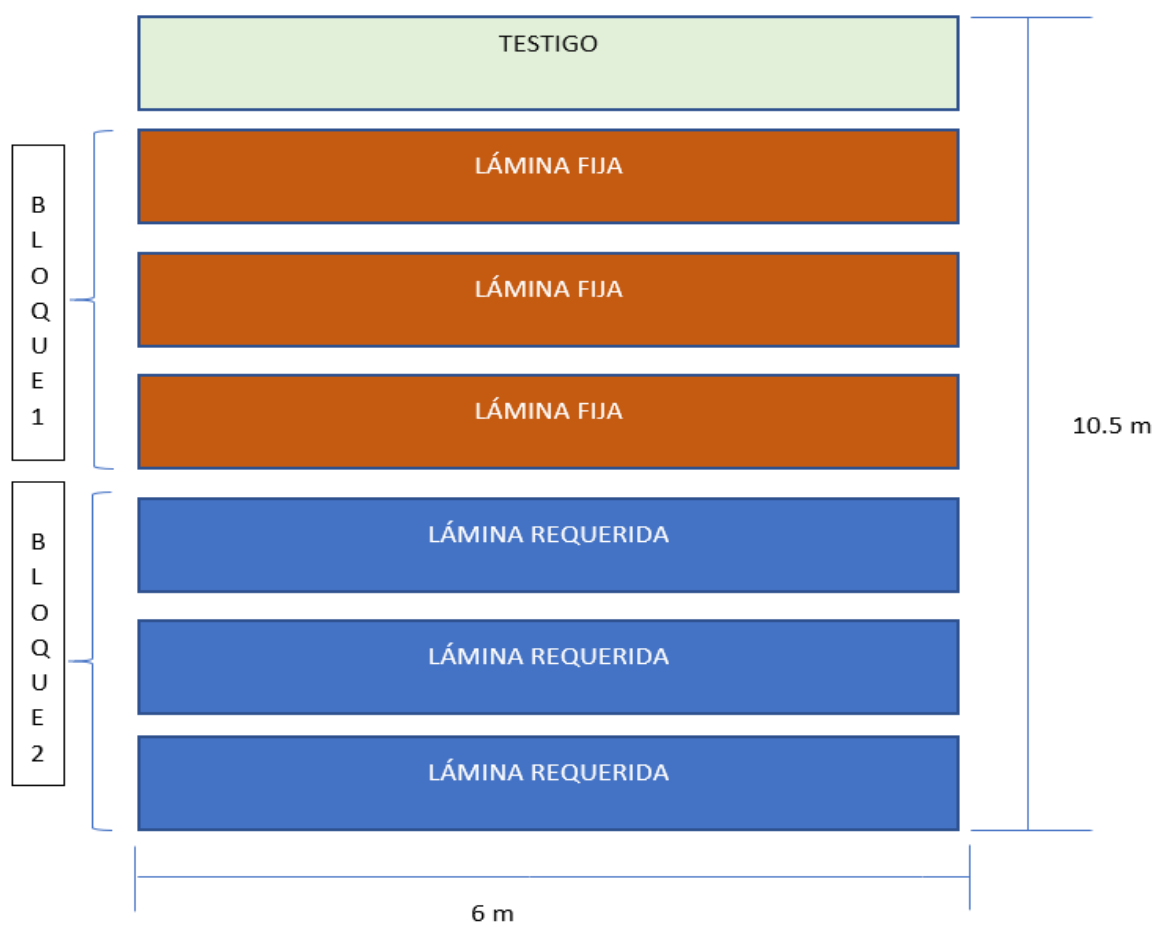


Figura 8. Representación gráfica del diseño experimental. Fuente propia.

Para la realización del sistema experimental se hicieron las mediciones de las longitudes de las camas, se dejó un metro al inicio y un metro al final para prevenir problemas de mediciones por variaciones por el efecto borde que pueden tener las plantas que están más expuestas al medio ambiente, además se ocupó el área central del terreno cómo área efectiva de siembra.



Figura 9. Demarcación del origen de camas por medición con cinta métrica.  
Fuente propia

En la Figura 9 se muestra la medición de las camas con una cinta métrica, el procedimiento se realiza con el fin de tener una mejor zona de trabajo para evitar posibles inconvenientes a futuro con lo que puede ser una posible plaga.

En la siguiente figura se observa el diseño experimental plasmado en el campo de pruebas donde se colocaron los bloques de tratamiento según la metodología explicada.



Figura 10. Diseño experimental concluido. Fuente propia.

#### 4.4 Instalación de sensores de medición

Para la medición de la humedad se utilizaron sensores de humedad, así como sensores de tensión de agua en el suelo, los cuales fueron calibrados con anticipación para el suelo específico del campo de pruebas del ITCR, sede Cartago, a continuación, se muestran los modelos específicos utilizados para dichas pruebas.



Figura 11. Watermark (sensor de tensión de agua en el suelo). Fuente: (“Irrrometer Sensors,” s.f.)



Figura 12. Soilwatch 10 Pino - Tech (sensor de humedad). Fuente: (“SoilWatch 10 - Soil Moisture Sensor - PINO-TECH,” s.f.)

Cada cama cuenta con una grilla de 6 sensores, 2 watermark y 4 soilwatch 10 específicamente, todos los sensores están colocados a lo largo distribuidos homogéneamente en aproximadamente 6 metros. Cada uno de los sensores está conectado a un sistema electrónico diseñado previamente de manera que los sensores depositan la información en tarjetas SD. Los intervalos de medición serán los siguientes:

Cuadro 3. Intervalos de medición de cada uno de los sensores.

Sensor	Tiempo (h)
Soilwatch 10	0,5
Watermark	4

Fuente: Propia.

Para la instalación del equipo de medición se colocaron los módulos de suelo sobre la cama de manera que se pudiera delimitar el área de experimentación, todos los sensores fueron enterrados a la profundidad radicular del cultivo en estudio que es de unos 20 cm aproximadamente, se utilizó tubo de PVC Conduit para proteger el cableado de posibles daños por las condiciones climáticas y animales.



Figura 14. Sensores de medición colocados en el terreno. Fuente propia



Figura 13. Área de experimentación delimitada con sensores enterrados. Fuente propia.

En la primera Figura 14 se denotan los 7 módulos de suelo con todos componentes antes mencionados, más adelante se ilustra la manera en la fueron colocados en el terreno ya con la zona delimitada.

#### **4.4.1 Calibración de equipo de medición**

Para la interpretación de los sensores fueron utilizadas en el caso de los Soilwatch 10 la curva de contenido volumétrico de agua del suelo en específico que fue relacionada directamente con los valores del voltaje encontrados con los sensores. De forma detallada se realizaron los siguientes pasos:

- a) Se extendió el suelo.
- b) Se eliminaron las irregularidades del suelo como piedras, basuras y raíces que puedan distorsionar su densidad.
- c) Se secó el suelo ya sea en un horno a  $105^{\circ}$  C durante 24 horas o durante una semana extendido en un ambiente seco.
- d) Se prepararon recipientes con suelo seco y se pesó el peso de los recipientes y el suelo.
- e) Se añadieron volúmenes definidos de agua de manera que el mayor fuera el saturado más saturado y el menor fuera el suelo seco.
- f) Se dejaron reposar y se tomaron pesos de suelo húmedo.
- g) Para finalizar se introducen los sensores Soilwatch 10 para relacionar los valores de humedad propios del suelo del lugar.

- h) Una vez obtenidos tanto el valor del porcentaje de humedad por medio de la ecuación 5 como los valores de los sensores se procede a realizar la curva de humedad utilizada para sacar los valores de humedad reales.



Figura 16. Muestras de suelo preparadas para la medición de humedad. Fuente propia.



Figura 15. Mediciones de diferentes valores de humedad con los sensores Soilwatch 10. Fuente propia.



Para el sensor de humedad se obtuvo la relación de los valores de humedad por medio de la metodología anteriormente explicada, en el siguiente gráfico se demuestra la relación del voltaje obtenido conforme a los valores de humedad medidos en laboratorio.

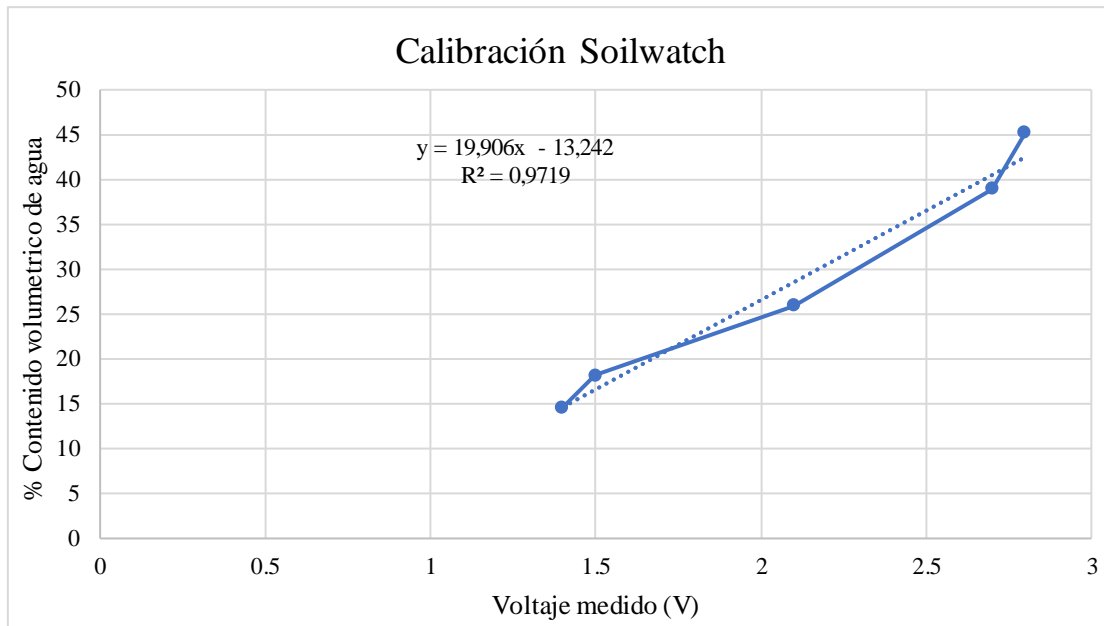


Figura 17. Gráfico de curva de calibración para el sensor de humedad de suelo Soilwatch 10. Fuente propia.

Como se puede observar se mantiene una relación lineal en la calibración con un indicador de buena relación entre los datos bastante buena así indicada por el R cuadrado que tiene un valor de 0,97, muy cercano a 1 que es el ideal.

Para la calibración de los sensores Watermark se utilizaron los valores de calibración recomendados por el fabricante que hace la conversión de la resistencia a su respectiva relación

En el siguiente gráfico se puede ver la relación de calibración del sensor de tensión que fue la brindada por el fabricante. Dicha calibración cumple claramente con la relación de linealidad con un indicativo de R cuadrado de 0,99.

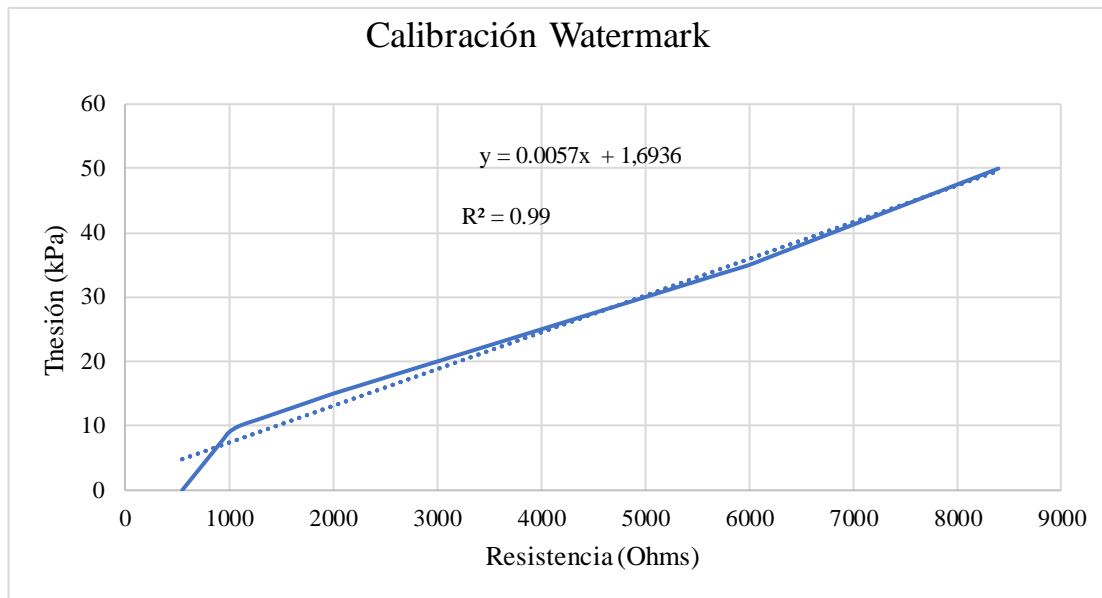


Figura 18. Curva de calibración del sensor Watermark. Fuente propia.

## 4.5 Diseño Agronómico

### 4.5.1 Estudio físico del suelo

#### 4.5.1.1 Técnicas de muestreo de suelo

Se realizaron tres diferentes muestreos para analizar posibles datos de importancia para el proyecto. Se sacaron tres muestras indisturbadas de suelo ubicadas aleatoriamente a lo largo del terreno, fueron realizadas por medio de cilindros muestreadores sacadas a la misma profundidad efectiva de los cálculos del sistema de riego ya que se necesitará ver el comportamiento del suelo a dicha profundidad.

También fueron necesarios los muestreos de suelo disturbados que también fueron sacados a profundidad efectiva, se utilizó la técnica de cuarteo para ambos muestreos que fueron aprovechados en el análisis químico del suelo y en el análisis de textura.

#### 4.5.1.2 Textura

Para el cálculo de la textura se utilizó el método de Bouyoucos por lo que se utilizó una muestra de suelo de 20g tamizada a 2 mm secada en el horno a 105°, dicha

muestra se vierte en la mezcladora de Bouyoucos con 200 ml de agua destilada y 15 ml de hexametáfosfato de sodio para separar las partículas de limo, arena y arcilla. Luego se bate por 15 minutos. Se agrega un litro de agua y se afora el cilindro de Bouyoucos hasta donde la marca lo indique para batir el agua y hacer una toma con el hidrómetro y el termómetro para realizar las correcciones a los 40 segundos y después se vuelve a hacer mediciones a los 40 minutos. Para el cálculo de las diferentes partículas se utilizan las siguientes formulas.

Para determinar la cantidad de materia en suspensión se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ material en suspensión} = \frac{\text{Lectura corregida hidrometro 40s}}{\text{Peso Muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Mientras en la siguiente ecuación se determina el porcentaje de arena que representa la muestra.

$$\% \text{ arena} = 100 - \% \text{ material en suspensión} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Mediante la siguiente ecuación se determina el porcentaje de arcilla de la muestra.

$$\% \text{ arcilla} = \frac{(\text{lectura corregida hidrometro 2 h})}{\text{peso muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación (3)}$$

El porcentaje de limo se calcula con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ limo} = 100 - \% \text{ arena} + \% \text{ arcilla} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Una vez finalizados los cálculos de los porcentajes de cada tipo de partícula se procede a determinar la textura por medio del triángulo de textura.

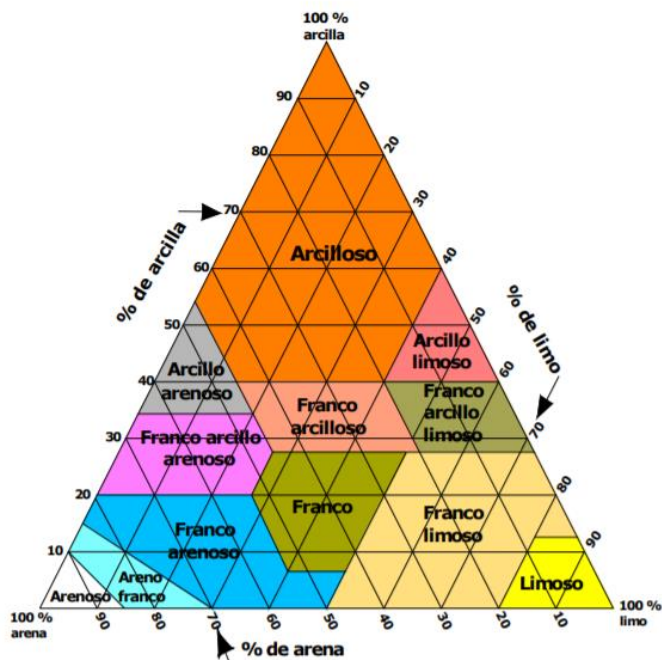


Figura 19. Triángulo de texturas USDA. Fuente: (Hidr & INTA EEA San Juan Ing Agr Nicolás Ciancaglini-Prosap, s.f.)



Figura 20. Prueba de Bouyoucos. Fuente propia.

### 4.5.1.3 Profundidad efectiva

Para el cálculo de la profundidad radicular, se consultó el sitio web de la FAO específicamente el artículo 56 (Evapotranspiración de un cultivo) donde se detallan las profundidades radicales de los diferentes cultivos (ver anexo 2).

### 4.5.1.4 PAR (Porcentaje de área humedecida)

Para el sistema de riego por goteo se inició calculando el Porcentaje de área bajo riego (PAR), con ayuda del cuadro adjuntado a continuación, fue necesario tomar en cuenta el caudal de descarga del gotero (Q got) que se escogió y la textura del suelo donde se desea desarrollar el proyecto. Con base a esos datos se pudo determinar el PAR que se requiere.

Cuadro 4.. Porcentaje del área de humedecida en el riego por goteo. Fuente:(Villalobos Araya, 2008)

Espaciamiento entre Laterales (m)	Descarga del Gotero(l/h)														
	Menos de 1.5			2			4			8			Más de 10		
	Textura del suelo														
	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
	Espaciamiento de los goteros sobre el lateral de (m)														
	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1	0,6	1	1,3	1	1,3	1,7	1,3	1,6	2
	Porcentaje del área bajo riego (estimado) (%)														
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,0	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100
2,0	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100
3,0	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68
4,0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	53
5,0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6,0	5	12	20	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40

#### 4.5.1.5 Cálculo de CC y PMP

Los valores de Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP), se determinaron mediante los platos de presión en el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería Agrícola. Se tomaron tres muestras para cada averiguar cada uno de los parámetros. Inicialmente, se midieron y pesaron los cilindros muestreadores con un vernier y una balanza analítica. Para ambas muestras (CC y PMP) fue necesario tomar el peso de la liga y malla colocadas en dichas muestras para ponerlas a saturar durante 24 horas. Para las muestras de PMP se preparó una muestra de suelo con agua para lograr que el suelo alcanzara una plasticidad aceptable que permitió rellenar los cilindros asignados para dichas pruebas.

Dichas muestras se colocaron en las ollas de presión a 0,33 atm (CC) y 15 atm (PMP), las cuales permanecieron durante tres semanas en dichas ollas. Posteriormente se sacaron las muestras para pesarlas y colocarlas en el horno a 105 °C durante 24 horas, seguidamente se volvió a pesar y por diferencia de pesos se determinó el porcentaje de humedad gravimétrica, mediante la siguiente ecuación.

$$CC\% \text{ o } PMP\% = \left( \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right) * 100 \quad \text{Ecuación(5)}$$

Donde:

$CC$  = Capacidad de campo (%).

$PMP$  = Punto de marchites permanente (%).

$P_{sh}$  = Peso de suelo húmedo (g).

$P_{ss}$  = Peso de suelo seco (g)

#### 4.5.1.6 Infiltración

Para la prueba de infiltración se utilizó el MINI DISK INFILTRÓMETRO MODEL S, primeramente, se limpió la superficie del suelo en el que se iban a realizar las mediciones, seguidamente se puso arena para nivelar la superficie de contacto. Se fijó una succión determinada por el tipo de suelo y se llenaron ambas cámaras del infiltrómetro con agua, como punto final se tomaron los tiempos de infiltración cada 5 mililitros para luego registrar

los tiempos en la MINI DISK MACRO (“MINI DISK INFILTROMETER | Hydraulic Conductivity in the Field | METER Environment,” s.f.) donde por medio de tiempos acumulados se obtiene una infiltración instantánea proporcionada automáticamente.



Figura 21. Colocación Infiltrómetro Mini Disk. Fuente propia.

#### 4.5.1.7 Densidad aparente

Se utilizaron cilindros muestreadores para obtener la densidad del cilindro una vez medido el volumen del contenedor y el peso de la muestra

$$Da = \frac{Pt - Pc - Pcap}{V} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde

$Da$  = Densidad aparente ( $\frac{g}{cm^3}$ )

$Pt$  = Peso muestra + cápsula (g)

$P_c$  = Peso de cilindro (g)

$P_{cap}$  = Peso de cápsula (g)

$V$  = Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)

Para obtener el volumen del cilindro se utilizó la ecuación (7).

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{4} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

$V$  = Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)

$D$  = Diámetro del cilindro (cm)

$h$  = Altura del cilindro (cm)

#### 4.5.2 Riego con Lámina fija

El riego por lámina fija es el que se aplica a las tres camas del bloque 1, su cálculo se realiza en función de la máxima capacidad de retención de agua aprovechable en el suelo en una frecuencia de riego constante.

##### 4.5.2.1 Lámina neta fija

Se obtuvo la lámina neta por medio de la siguiente fórmula donde se utilizó un valor de agotamiento proporcionado por la FAO, este valor se puede observar en el anexo 2, así como el valor de la profundidad radicular.

$$L_n = \left( \frac{CC - PMP}{100} \right) * P_e * Prof_{rad} * Ag \quad \text{Ecuación(8)}$$

Donde:

$L_n$  = Lámina neta (mm)

$CC$  = Capacidad de campo (%)

$PMP$  = Punto de marchitez permanente (%)

$P_e$  = Peso específico aparente (g/cm<sup>3</sup>)

$Prof_{rad}$  = Profundidad de raíces de la cebolla (mm)

$Ag$  = Agotamiento (decimal)



#### 4.5.2.2 Lámina neta real fija

En el riego por goteo es necesario poder aplicar la lámina correcta según el porcentaje de área bajo riego antes obtenido, por lo que será definido por la siguiente fórmula.

$$Ln_{real} = Ln * PAR \quad \text{Ecuación(9)}$$

Donde:

$Ln_{real}$  = Lámina neta real (mm)

$Ln$  = Lámina neta (mm)

$PAR$  = Porcentaje de área bajo riego (%)

#### 4.5.2.3 Evapotranspiración real y potencial

En el caso de la lámina fija fue utilizado un dato de  $Eto$  proporcionado de 3,62 mm/h según (Quesada Rodríguez, 2017) de una finca experimental a aproximadamente 2 km de distancia.

Al obtener la evapotranspiración potencial fue necesario multiplicarla por un factor de cultivo que dependerá de la etapa de crecimiento en la cual se encuentre, esta estimación se realizó según las fases del cultivo de lechuga en el anexo 3, y los coeficientes fueron verificados en el anexo 1.

$$Etr = Eto * Kc \quad \text{Ecuación(10)}$$

Donde:

$Etr$  = Evapotranspiración real (mm/día)

$Eto$  = Evapotranspiración potencial (mm/día)

$Kc$  = Coeficiente de cultivo

#### 4.5.2.4 Frecuencia de riego

Par el riego con lamina variable no fue necesario el cálculo de la frecuencia ya que la reposición es diaria. Sin embargo, para la lámina fija será necesario realizar el cálculo con la siguiente formula:

$$Fr = \frac{Ln_{real}}{Etr_{goteo}} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

$Fr$  = Frecuencia de riego (días)

$Ln_{real}$  = Lámina neta (mm)

$Etr_{goteo}$  = Evapotranspiración real para riego por goteo (mm/día)

#### 4.5.2.5 Recálculo de la lámina neta

Se recalcula la lámina neta una vez calculada la frecuencia de riego, dicha frecuencia tuvo que ser redondeada hacía el número anterior más cercano.

$$Ln_{recalc} = Fr * Etr \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

$Ln_{recalc}$  = Lámina neta recalculada (mm)

$Fr$  = Frecuencia de riego redondeada (día)

$Etr$  = Evapotranspiración real (mm/día)

#### 4.5.2.6 Eficiencia de riego

La eficiencia fue obtenida según los valores obtenidos de la siguiente relación que utiliza los siguientes valores, la relación de TR (transpiración) fue obtenida según (Villalobos Araya, 2008) y el coeficiente de uniformidad del riego por goteo ronda entre el 80% y el 100%. La siguiente ecuación despejada fue la encargada de dar el valor de eficiencia.

$$Ef = CU * T.R \quad \text{Ecuación (13)}$$

#### 4.5.2.7 Lámina bruta para tratamiento de riego fijo

Para el cálculo de la lámina bruta se utilizó la siguiente ecuación.

$$Lb = \frac{Ln_{recalc}}{Ef} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

$Lb$  = Lámina bruta (mm)

$Ln_{recalc}$  = Lámina neta recalculada (mm)

$Ef$  = Eficiencia de Riego (decimal)

#### 4.5.2.8 Tiempo de riego

El tiempo de riego se determinó con la siguiente ecuación

$$Tr = \frac{Lb * A}{Iap} \quad \text{Ecuación(15)}$$

Donde:

$A$  = Area de cultivo (m)

$Tr$  = Tiempo de riego (hr)

$Lb$  = Lámina bruta (m)

$Iap$  = Intensidad de aplicación

#### 4.5.3 Riego con Lámina requerida

El riego con lámina requerida es el que se aplicará a las camas del bloque 2, y se refiere a la reposición del agua consumida por evapotranspiración potencial, la cual se calculó por medio del software alimentado con datos climáticos reales que se detalla a continuación.

##### 4.5.3.1 Lámina neta requerida

Se utilizó la evapotranspiración real como lámina neta, se le aplicó al cultivo la lámina estimada un día antes en base a los datos climáticos y su cálculo, según el balance hídrico hecho el día mismo se decide ajustar la lámina del día siguiente para reponer si fue un poco más o disminuir el tiempo de aplicación si el mismo fue diferente según la estimación del  $Eto$  que es la variable que afecta directamente explicada en los siguientes pasos.

##### 4.5.3.2 Lámina neta real requerida

Se calculó en base al porcentaje de área regada como lo indica la ecuación 9 en el procedimiento del riego con lámina fija.

#### **4.5.3.1 Evapotranspiración real y potencial**

Para calcular la evapotranspiración potencial fue necesaria la recolección de datos de clima a tiempo real por medio de la página oficial del Instituto Meteorológico Nacional para el caso del cálculo de la lámina a aplicar en el tratamiento de lámina requerida. En el caso de la Eto para el tratamiento de lámina requerida fue necesario utilizar el software CROPWAT 8.0 donde se introdujeron los datos proporcionados de la página del IMN, además fue necesaria la introducción de las coordenadas específicas para el cálculo de la radiación del programa, así como la utilización del CLIMWAT 8.0 para obtener las horas de insolación promedio de la provincia de Cartago según las estaciones existentes de la FAO.

Al igual que el procedimiento del tratamiento de lámina fija se utiliza la ecuación 10 para contemplar las etapas de crecimiento.

#### **4.5.3.2 Frecuencia de riego y balance hídrico.**

Para el riego con lamina requerida se definió una frecuencia diaria de manera automatizada (Rain Bird Electronic Garden House Sprinkler Timer), y se definió la lámina consumida cada día para su debida reposición.

Para determinar dicha lámina consumida se realizó un balance hídrico diario mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Balance} = E_{tr} - P \quad \text{Ecuación(16)}$$

Donde:

$E_{tr}$  = Evapotranspiración (mm)

$P$  = Precipitación (mm)

El análisis se realizaba considerando los niveles de infiltración del suelo para no sobreestimar el aporte de lámina por la precipitación. Cuando se presentaron val

#### **4.5.3.3 Eficiencia de riego**

La eficiencia se obtuvo por el mismo método y ecuación que en la del tratamiento del riego con lámina fija.

#### **4.5.3.4 Lámina bruta requerida**

Para el cálculo de la lámina bruta se utilizó la siguiente ecuación.

$$Lb = \frac{Etr}{Ef} \quad \text{Ecuación(17)}$$

Donde:

$Lb$  = Lámina bruta (mm)

$Etr$  = Evapotranspiración (mm)

$Ef$  = Eficiencia de Riego (decimal)

#### **4.5.3.5 Tiempo de riego**

El tiempo de riego se determinó con la siguiente ecuación 15 al igual que en el método anterior.

#### **4.5.3.6 Riego de cama control**

La cama control no cuenta con sistema de riego y recibió solo el agua proporcionada por la precipitación y un riego ocasional con regadera para humedecer las plantas en las primeras 5 semanas.

#### **4.5.4 Máximo número de operaciones**

Se determinó que se realizará una operación en todos los tratamientos debido al manejo que se pretende darle al cultivo.

#### **4.5.5 Caudal del sistema**

Se determinaron los caudales a utilizar por cada riego para obtener un valor real del consumo de agua.

$$Q_s = \frac{A_f * L_b}{T_r * N_{op}} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

$Q_s$  = Caudal del sistema

$A_f$  = Área de la finca (m<sup>2</sup>)

$L_b$  = Lámina bruta (m)

$T_r$  = Tiempo de riego (h)

$N_{op}$  = Número de operaciones

#### 4.5.6 Elección del gotero

Se seleccionó la cinta de goteo según las opciones que se tenían a disposición para trabajar en el lugar de la prueba.

#### 4.5.7 Intensidad de aplicación

Se comprobó la intensidad de aplicación obtenida en el campo, además se realizaron pruebas previas.

$$I_{ap} = \frac{Q_g}{E_g * E_l} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde

$I_{ap}$  = Intensidad de aplicación (mm/h)

$Q_g$  = Caudal del gotero (l/h)

$E_g$  = Espaciamiento entre gotero (m)

$E_l$  = Espaciamiento entre líneas de goteo (m)

#### 4.5.8 Estudio químico del suelo

Se realizó un estudio químico completo del suelo en el Centro de investigación agronómica (CIA) de manera que se pudieran suplir mejor las necesidades de la planta según las deficiencias del suelo.

## 4.6 Diseño hidráulico

Para el diseño hidráulico se realizó una inspección previa en la que se evaluaron diferentes aspectos para realizar las modificaciones necesarias en el nuevo diseño de riego que se utilizó en el experimento.

### 4.6.1 Presión de operación

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de riego se realizaron pruebas con la cinta que se utilizaría y se verificó que los goteros funcionaran correctamente con la presión en el lugar.

### 4.6.2 Diámetro de la tubería principal.

Para seleccionar el diámetro de la tubería principal se verificó el diámetro de la tubería madre y se realizó una salida específica para el sistema de riego de la prueba con el mismo diámetro.



Figura 22. Tubería principal.  
Fuente Propia

### **4.6.3 Diámetro de la múltiple.**

Para el diámetro de la múltiple se realizó una modificación del diámetro que traía la tubería principal, esto con el fin de aumentar el caudal de operación para poder regar 3 camas simultáneamente.

### **4.7 Evaluación de impacto ambiental por medio de cálculo de huella hídrica**

Para realizar el análisis ambiental se comparó directamente los caudales de agua utilizados durante todos los riegos de los tratamientos evaluados, por lo que se realizó la medición del caudal del sistema durante todo el proceso, con esto se puede saber la diferencia en el impacto al ambiente debido a la disminución de la huella hídrica que puede tener un proyecto de esta índole a gran escala por la aplicación del riego.

### **4.8 Análisis de producción y sensores**

#### **Análisis de producción**

Para realizar el análisis de la producción se realizaron muestreos al azar de cada una de las camas donde se cortaron 4 lechugas de cada una y fueron medidos los siguientes aspectos:

- a) Peso de lechuga
- b) Largo y peso de raíz
- c) Largo y ancho de 3 hojas externas (escogidas al azar)
- d) Ancho de tallo

El muestreo mencionado se realizó en la mitad del ciclo del cultivo y al finalizar por lo que se realizó en semana 5 y en semana 8. Todos los resultados se tabularon en Excel para su posterior análisis. Los datos tabulados del muestreo se analizaron por medio de lenguaje estadístico de R en específico por medio del programa R Studio. Se realizó



entonces un análisis de varianzas (ANOVA) donde se obtuvo el análisis de medias y así se pudo comprobar si de verdad existían diferencias significativas en las variables evaluadas que fueron las mencionadas en el muestreo.

Para saber si existían diferencias según la teoría se plantearon dos hipótesis como respuesta al análisis de varianza que estima una probabilidad estadística (P):

- ✓ Hipótesis Nula: El promedio de la variable en los grupos es igual, con 95% de confiabilidad (cuando P es mayor a 0,05).
- ✓ Hipótesis Alternativa: En al menos un grupo el promedio de peso es distinto, con 95% de confiabilidad (P es menor a 0,05).

Por lo tanto, dependiendo del valor final de “P” se acepta una u otra hipótesis, en caso de avalar la hipótesis alternativa se procedió a realizar la prueba de Tukey para así poder determinar en cuales grupos existía diferencia entre sí. Con esta prueba se puede aseverar cuales tratamientos presentan las mayores diferencias entre sus promedios y cuales son estadísticamente diferentes.

### **Análisis de sensores**

Para el análisis de sensores se realizó una tabulación meticulosa de cada uno de los datos de porcentaje de humedad gravimétrica para los sensores Soilwatch así como de potencial matricial con los sensores Watermark. A continuación, se hizo un descarte de valores atípicos (errores de conexión, cambios de batería) con respecto al comportamiento de los sensores, se procedió a agruparlos según cama y tratamiento para poder relacionarlos y de esta manera intentar diferenciar un comportamiento representativo de cada tratamiento por medio de las gráficas.

Se utilizaron gráficos de caja o diagramas de cajas para observar los valores de los sensores de manera resumida, además se utilizaron gráficos de líneas en el caso del SoilWatch y puntos en el caso del Watermark para observar el comportamiento de todos los sensores y según las medias se definió un sensor con comportamiento representativo por cada tratamiento para realizar un gráfico final resumido de los tres tratamientos.

#### **4.9 Mantenimiento del sistema de riego**

Se realizó un mantenimiento en el sistema de riego a lo largo del experimento para asegurar un buen funcionamiento y evitar las fugas para un correcto análisis.

#### **4.10 Labores Agrícolas**

Se realizaron los cuidados respectivos de las plantas tanto con las labores manuales agrícolas como con las labores de aplicaciones de enmiendas y demás cuidados preventivos como lo son los fungicidas e insecticidas. Dichos cuidados fueron efectuados semanalmente y con supervisión de un agrónomo, se utilizó el análisis químico completo de suelo realizado en el CIA adjunto en los anexos 4 y 5 para tomar las decisiones con la supervisión profesional. Las aplicaciones fueron aplicadas de manera uniforme para todas las plantas para no interferir en los resultados. Todo fue anotado una bitácora de trabajo.

#### **4.11 Análisis económico**

Para el análisis económico se realizó el cálculo de cada uno de los gastos incurridos tanto en la inversión inicial, así como a lo largo de todo el proceso y los precios finales tanto de mano de obra como de insumos. Después de obtener los gastos se procedió a aplicar las siguientes fórmulas para obtener parámetros económicos de factibilidad.

##### **4.11.1 Cálculo de saldo anual**

$$SA = I - E \qquad \text{Ecuación (20)}$$

Donde

SA = Saldo anual (colones)

I = Ingresos (colones)

E = Egresos (colones)

#### 4.11.2 Cálculo de saldo acumulado en el año cero

Primeramente, se tomó el valor del saldo anual y seguidamente se calculó sumando el saldo acumulado del año anterior y el saldo del año siguiente.

#### 4.11.3 Valor actual neto

El indicador de factibilidad de Valor Actual Neto (VAN) se calculó con la siguiente ecuación

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Cf_t}{(1+k)^t} - Cf_0 \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde:

VAN =  $CF_t$ : Valor presente de las entradas de efectivo (colones)

$CF_0$  = Inversión inicial (colones)

K = Tasa equivalente al costo de capital de la empresa (costo de oportunidad, puede usarse la inflación) (%)

T = Tiempo (h)

#### 4.11.4 Tasa Interna de Retorno

Mientras que la Tasa Interna de Retorno (TIR), fue calculada con la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{Cf_t}{(1+TIR)^t} - Cf_0 \quad \text{Ecuación (22)}$$

Donde:

$CF_t$ : Valor presente de las entradas de efectivo (colones)

$CF_0$  = Inversión inicial (colones)

TIR = Taza interna de retorno

## **5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## **5.1 Diseño Agronómico**

### **5.1.1 Estudio físico del suelo**

#### **5.1.1.1 Textura**

Para la prueba de textura se obtuvieron los siguientes porcentajes especificados en el cuadro de componentes de suelo. Según la metodología por el triángulo de texturas el suelo es de tipo arcilloso al tener como se demuestra en el cuadro un gran porcentaje de arcillas.

Cuadro 5. Porcentajes de textura para el suelo de práctica.

<b>Porcentaje de componentes</b>		
<b>Arena %</b>	<b>Limo %</b>	<b>Arcilla %</b>
<b>17</b>	<b>16</b>	<b>67</b>

Fuente: propia

#### **5.1.1.2 Profundidad efectiva**

Según la FAO la profundidad radicular será de 30 cm aproximadamente, por las condiciones duras de terreno y experiencias previas se utilizó una profundidad de 20 cm para no sobreestimar el riego y hacerlo preciso a las condiciones del lugar.

#### **5.1.1.3 PAR (Porcentaje de área humedecida)**

Según lo estipulado por la tabla de la metodología y por los espaciamientos en el tipo de terreno se obtuvo un PAR de 100 % y esto se debe a que dichos cálculos contemplan mayoritariamente riegos por goteo en cítricos por lo que al reducir considerablemente los espaciamientos en hortalizas se logra humedecer en su totalidad el área de siembra.

#### **5.1.1.4 Cálculo de CC y PMP**

Para el cálculo final del CC y PMP se utilizó el promedio de las tres muestras para obtener los valores CC de 47,16 % y un PMP 17,50 %.

### 5.1.1.5 Infiltración

Para la prueba de infiltración se obtuvo un promedio de las pruebas realizadas, dichas pruebas dieron un promedio de 48,51 mm/hr, que es mucho mayor que los valores teóricos de los suelos de tipo arcilloso, esto probablemente se debe a la mecanización realizada en el suelo que en algunas partes presenta hasta agrietamientos que crean macro espacios que hace que se infiltre gran cantidad de agua, este fenómeno es el de arcillas expansivas.

### 5.1.1.6 Densidad aparente

Según el muestreo realizado en el lugar se pudo obtener valores de densidad similares que se promediaron para obtener un valor con el cuál trabajar. En el Cuadro 6 se demuestran los valores finales.

Cuadro 6. Valores de densidad obtenidos en pruebas de campo.

Densidad aparente (cc/ml)
1,24
1,18
1,20
Promedio = 1,20

Fuente: propia

Como se puede ver el valor es de 1,20 que es normal para el tipo de suelo del lugar que es de tipo arcilloso.

## 5.2 Estudio químico del suelo

Se presentan en los Cuadros 7 y 8 el análisis de suelo hecho en laboratorio donde se evaluaron los aspectos más importantes para el cultivo de lechugas, para así asegurar que no haya problemas de crecimiento por deficiencias en el suelo, se aplicaron en iguales cantidades enmiendas químicas para suplir los faltantes que tenía el suelo.

Cuadro 7. Análisis químico de suelos primera parte.

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS													
Solución Extractora:		pH	cmol(+)/L					%	mg/L				
KCl-Olsen Modificado		H <sub>2</sub> O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
<b>ID USUARIO</b>	<b>ID LAB</b>	5,5	0,5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5
CAMPO DEL ITCR	S-20-03824	5,9	0,12	8	4,19	0,74	13,11	0,9	4	6,3	14	85	21

Fuente: CIA

Cuadro 8. Análisis químico de suelos segunda parte.

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS					
		mS/cm	%		Relación
		CE	C	N	C/N
<b>ID USUARIO</b>	<b>ID LAB</b>	1,5			
CAMPO DEL ITCR	S-20-03824	0,1	2,29	0,23	10

Fuente: CIA.

Bajo el criterio profesional de un agrónomo se puede apreciar que el nivel de pH es superior al nivel crítico, esto se comprueba con bajo valor de acidez intercambiable y el 3,3 % de MO. El contenido de elementos es alto y su relación entre ellas también por lo que hay un buen índice de fertilidad natural. El fósforo es un elemento deficiente en el suelo, también por un bajo porcentaje de materia orgánica es necesario una buena aplicación de nitrógeno, debido a que por el porcentaje bajo de MO se están formando organominerales muy estables. Por lo que se aplicaron enmiendas foliares y fertilizantes ricos en P y N.

### 5.3 Equipo de riego

Se utilizó cinta de riego con gotero incorporado que proporciona un caudal de 1l/hr a un espaciamiento de 30 cm, con el cuál se obtiene un humedecimiento óptimo. En base al proyecto se realizó el diseño para obtener una aplicación controlada de lámina en ambos tratamientos además de su instalación y sus pruebas de funcionamiento posterior para verificarlo. No se requirieron diferentes materiales en el diseño hidráulico puesto que lo que

varía son los tiempos de aplicación y la frecuencia de riego, por lo que fue necesario utilizar válvulas por separado para un accionamiento diferenciado por medio de un “timer” instalado en la tubería principal que automatizaba la aplicación.

#### **5.4 Intensidad de aplicación**

La intensidad de aplicación es la misma para ambos tratamientos debido a que no existe ninguna diferencia entre ambos diseños, la intensidad tiene un valor de 8,3 mm/hr debido al espaciamiento de 40 cm entre cintas y 30 cm entre goteras, el suelo no presenta problemas de percolación debido a que el suelo al tener condición de arcillas expansivas absorbe de gran manera la aplicación y así fue comprobado por medio de pruebas de riego hechas con anterioridad.

#### **5.5 Diámetros del diseño hidráulico**

Con las pruebas de presión realizadas se determinó seguir con el mismo diámetro de la tubería madre por lo que la tubería principal será de 1”, la tubería múltiple será de un diámetro de 1,5” para asegurar un buen funcionamiento de los goteros, al ser un diseño experimental de pequeña extensión el cálculo de las perdidas específicas fue despreciable y se probó su correcto funcionamiento para evitar problemas en la aplicación del riego.



Figura 23. Tubería múltiple. Fuente propia.



## **5.6 Cálculos de riegos a aplicar**

### **5.6.1 Riego con Lámina de agua fija**

#### **5.6.1.1 Lámina neta fija**

Según la formula aplicada se obtiene una lámina neta igual para todas las etapas debido a que es determinada por los factores de suelo especificados en la formula, el valor es de 21.35 mm.

#### **5.6.1.2 Lámina neta real fija**

Al utilizar un PAR de 100% por el espaciamiento el valor de la lámina neta real fija termina siendo el mismo de 21,35 mm.

#### **5.6.1.3 Evapotranspiración real y potencial**

La evapotranspiración potencial será de 3,62 mm/día como se estipuló en la metodología, de la Eto se obtuvo la Etr diferenciada para cada una de sus etapas de crecimiento donde en la primera etapa fue de 2,53 mm/día debido a su coeficiente de crecimiento de 0,7 y en la segunda etapa será de 3,62 mm/día debido al coeficiente asignado con valor de 1.

#### **5.6.1.4 Frecuencia de riego**

La frecuencia de riego fija fue asignada según la metodología con un valor final de 7 días, regándose así una vez a la semana, dicha frecuencia fue utilizada hasta el final de la cosecha.

#### **5.6.1.5 Recálculo de la lámina neta**

Para el cálculo de la lámina neta del riego fijo se obtuvieron dos valores de 20,27 mm/día y 28,96 mm/día para las dos fases de crecimiento respectivamente.

#### **5.6.1.6 Eficiencia de riego**

El valor de la eficiencia es de 85% que es un valor correcto para sistemas de goteo, fue determinado mediante la obtención de coeficiente de uniformidad fue asignado como

90% y el coeficiente de transpiración que según las características de suelo fino y la profundidad de las raíces es de 100%.

### **5.6.1.7 Lámina bruta para tratamiento de riego fijo**

La lámina bruta fue dividida en dos partes debido a la diferencia de las etapas de crecimiento, los valores obtenidos fueron 23,85 mm y 34,10 mm.

### **5.6.1.8 Tiempo de riego**

El tiempo de riego también presentó dos resultados para las dos diferentes etapas, en la primera etapa el tiempo de riego fue de 110 min en la primera etapa y en la segunda etapa de 155 min.

### **5.7.1 Riego con Lámina de agua requerida**

#### **5.7.1.1 Lámina neta requerida, evapotranspiración potencial y evapotranspiración real**

En el Cuadro 9 se presentan las láminas netas calculadas para cada uno de los días siguiendo el análisis aplicado de la reposición de la evapotranspiración día a día. Se presenta la evapotranspiración potencial al lado que es la base para calcular la evapotranspiración.

Cuadro 9. Valores de evapotranspiración potencial y real.

Día	Eto (mm/día)	Etr (mm/día)	Día	Eto (mm/día)	Etr (mm/día)
1	3,04	2.13	26	2.95	2.95
2	3.04	2.13	27	3.03	3.03
3	2.66	1.86	28	3.07	3.07
4	2.66	1.86	29	2.97	2.97
5	2.73	1.91	30	2.97	2.97
6	2.84	1.99	31	2.90	2.90
7	3.15	2.21	32	2.82	2.82
8	2.95	2.07	33	2.94	2.94
9	3.00	2.10	34	2.90	2.90
10	3.06	2.14	35	2.92	2.92
11	3.00	2.10	36	2.93	2.93
12	3.10	2.17	37	2.84	2.84
13	3.05	2.14	38	2.85	2.85
14	3.03	2.12	39	2.88	2.88
15	3.03	2.12	40	3.00	3.00

Día	Eto (mm/día)	Etr (mm/día)	Día	Eto (mm/día)	Etr (mm/día)
16	3.08	2.16	41	2.96	2.96
17	3.01	2.11	42	2.89	2.89
18	3.04	2.13	43	2.89	2.89
19	2.92	2.04	44	2.89	2.89
20	3.02	2.11	45	2.86	2.86
21	3.03	2.12	46	2.88	2.88
22	3.06	3.06	47	2.92	2.92
23	3.02	3.02	48	2.86	2.86
24	2.98	2.98	49	2.79	2.79
25	2.99	2.99			

Fuente: propia.

Los valores de la lámina fueron similares durante todos los días del proceso de producción, sin embargo, se puede observar una diferencia notable en los niveles del día 20 en adelante y esto se debe a la diferencia del coeficiente de crecimiento de cultivo que afecta directamente el valor de la lámina, por lo que aumenta en la segunda etapa. En el siguiente gráfico se puede apreciar la diferencia mencionada, los valores en la primera etapa rondan los 2 mm/día, al pasar la segunda etapa que es la final se aumenta considerablemente llegando a valores cercanos a 3 mm/día.

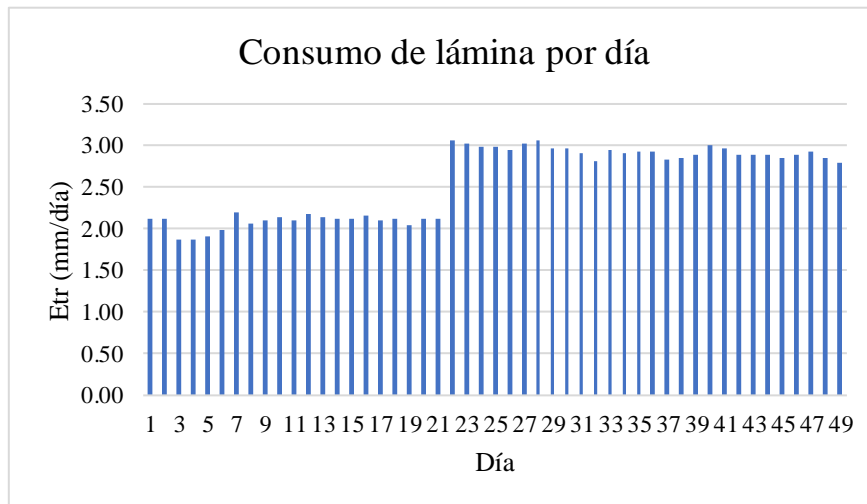


Figura 24. Gráfico de lámina consumida por día. Fuente propia.

### 5.7.1.2. Lámina neta real requerida

Al igual que la lámina neta del riego fijo el porcentaje de área regada es de 100 % por lo que la lámina neta real es igual a la lámina neta calculada para cada uno de los días en el paso anterior.

### 5.7.1.3 Eficiencia de riego

La eficiencia de riego es de 85% al igual que en el tratamiento de riego fijo debido a que no hay diferencia alguna en los porcentajes de coeficiente de uniformidad y el porcentaje de transpiración.

### 5.7.1.4 Lámina bruta requerida

En el Cuadro 10 se demuestran los valores de lámina bruta conseguida para cada uno de los días de riego, sigue un comportamiento similar al de la lámina neta al ser multiplicado por un constante por lo que las láminas brutas de los primeros 20 días son menores que las del resto de los días.

Cuadro 10.Lámina bruta diaria.

Día	Lb (mm)	Día	Lb (mm)
1	2.50	26	3.47
2	2.50	27	3.56
3	2.19	28	3.61
4	2.19	29	3.49
5	2.25	30	3.49
6	2.34	31	3.41
7	2.59	32	3.32
8	2.43	33	3.46
9	2.47	34	3.41
10	2.52	35	3.44
11	2.47	36	3.45
12	2.55	37	3.34
13	2.51	38	3.35
14	2.50	39	3.39
15	2.50	40	3.53
16	2.54	41	3.48
17	2.48	42	3.40

Día	Lb (mm)	Día	Lb (mm)
18	2.50	43	3.40
19	2.40	44	3.40
20	2.49	45	3.36
21	2.50	46	3.39
22	3.60	47	3.44
23	3.55	48	3.36
24	3.51	49	3.28
25	3.52		

Fuente: propia.

### 5.7.1.5 Tiempo de riego en base a balance hídrico.

El tiempo de riego para cada día fue calculado según el balance hídrico calculado día a día, en el Cuadro 11 se demuestra los niveles de precipitación, así como la lámina aplicada en caso de no ser repuesta por la precipitación y los remanentes de lámina del suelo cuando existió un sobre cálculo debido a la predicción.

Cuadro 11. Balance hídrico para cada uno de los días.

Fecha	ETR (mm)	Precipitación (mm)	Lámina Remanente por riego estipulado (mm)	Balance(mm)
1	2,13	0,00	0,00	2,13
2	1,86	0,20	0,00	1,66
3	1,86	4,20	0,50	-2,84
4	1,91	3,80	0,00	-1,89
5	1,99	0,00	0,25	1,74
6	2,21	0,60	0,50	1,11
7	2,07	38,80	0,00	-36,74
8	2,10	10,40	0,00	-8,30
9	2,14	0,00	0,00	2,14
10	2,10	1,20	0,00	0,90
11	2,17	0,20	0,00	1,97
12	2,14	10,40	0,00	-8,27
13	2,12	1,00	0,00	1,12
14	2,12	0,20	0,00	1,92
15	2,16	0,20	0,00	1,96
16	2,11	0,00	0,00	2,11

Fecha	ETR (mm)	Precipitación (mm)	Lámina Remanente por riego estipulado (mm)	Balance(mm)
17	2,13	40,80	0,00	-38,67
18	2,04	0,20	0,25	1,59
19	2,11	30,20	0,00	-28,09
20	2,12	7,00	0,00	-4,88
21	3,06	0,20	0,00	2,86
22	3,02	8,20	0,00	-5,18
23	2,98	33,80	0,00	-30,82
24	2,99	0,60	0,00	2,39
25	2,95	0,20	0,00	2,75
26	3,03	0,00	0,00	3,03
27	3,07	0,00	0,00	3,07
28	2,97	4,00	0,20	-1,23
29	2,97	38,60	0,00	-35,63
30	2,90	14,40	0,00	-11,50
31	2,82	5,40	0,20	-2,78
32	2,94	2,20	0,00	0,74
33	2,90	0,40	0,00	2,50
34	2,92	0,20	0,00	2,72
35	2,93	0,00	0,00	2,93
36	2,84	4,60	0,20	-1,96
37	2,85	40,60	0,00	-37,75
38	2,88	10,00	0,20	-7,32
39	3,00	0,00	0,00	3,00
40	2,96	1,80	0,00	1,16
41	2,89	0,00	0,00	2,89
42	2,89	77,40	0,00	-74,51
43	2,89	25,00	0,25	-47,11
44	2,86	0,20	0,00	2,66
45	2,88	0,20	0,00	2,68
46	2,92	0,20	0,00	2,72
47	2,86	0,00	0,00	2,86
48	2,79	0,00	0,20	2,59

Fuente: propia

Al obtener el balance se realiza la estimación de lo que se necesita regar según las fórmulas estipuladas, se toman en cuenta los valores negativos del balance como remanente de agua en el suelo y los valores positivos como la lámina que hace falta reponer. Entonces según el balance los días negativos no se aplicó riego al día siguiente según las pruebas realizadas en el lugar debido a que el remanente que se obtiene humedece el suelo, pero

después de un día presenta grietas, en el Cuadro 12 se aprecian los tiempos de riego utilizados todos los días.

Cuadro 12. Tiempos de riego para riego de lámina requerida.

Día	Tiempo real de riego (mm)
1	13
2	13
3	11
4	11
5	11
6	11
7	11
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	13
14	13
15	5
16	13
17	13
18	13
19	12
20	13
21	13
22	0
23	18
24	18
25	18
26	18
27	18
28	18
29	18
30	0
31	0
32	17
33	18
34	18
35	18
36	18

Día	Tiempo real de riego (mm)
37	17
38	0
39	17
40	18
41	18
42	18
43	18
44	0
45	0
46	18
47	18
48	18
49	17

Fuente: propia

### 5.8 Caudal del sistema

Se determinaron los caudales de riego para cada uno de los riegos aplicados tanto para el riego de lámina variable cómo para el riego de lámina fija y de esta manera poder estimar el agua utilizada para cada uno de los sistemas, con el fin de hacer una comparación certera de ambos sistemas.

Cuadro 13. Caudal utilizado por los tratamientos cada uno de los días.

Día	Lámina Fija (m3)	Lámina Requerida (m3)
1	0,72	0,08
2	0,00	0,08
3	0,00	0,07
4	0,00	0,07
5	0,00	0,07
6	0,00	0,07
7	0,00	0,08
8	0,72	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,08
14	0,00	0,08



Día	Lámina Fija (m3)	Lámina Requerida (m3)
15	0,72	0,08
16	0,00	0,08
17	0,00	0,07
18	0,00	0,08
19	0,00	0,07
20	0,00	0,08
21	0,00	0,08
22	1,03	0,00
23	0,00	0,11
24	0,00	0,11
25	0,00	0,11
26	0,00	0,10
27	0,00	0,11
28	0,00	0,11
29	1,03	0,11
30	0,00	0,00
31	0,00	0,00
32	0,00	0,10
33	0,00	0,10
34	0,00	0,10
35	0,00	0,10
36	1,03	0,10
37	0,00	0,10
38	0,00	0,00
39	0,00	0,10
40	0,00	0,11
41	0,00	0,11
42	0,00	0,10
43	1,03	0,10
44	0,00	0,00
45	0,00	0,00
46	0,00	0,10
47	0,00	0,10
48	0,00	0,10
49	0,00	0,10
Total	6,28	3,47

Fuente: propia.

El Cuadro 13 demuestra la cantidad de agua en metros cúbicos utilizada donde se nota una disminución del uso del agua debido a los tiempos de riego utilizados para aplicar la

lámina, los caudales de los goteros son iguales para todas las camas, así como el número de goteros por cama por lo que se sabe con certeza que el cálculo será muy cercano a la realidad.

### 5.9 Evaluación de impacto ambiental por medio de cálculo de huella hídrica

Para el cálculo del impacto ambiental se comparan los niveles de consumo de agua según tratamiento para con ello poder medir el gasto de agua que sería el equivalente a la huella hídrica generada por el proyecto. En la Figura 25 se puede ver la diferencia de volúmenes alcanzado al final del proyecto.

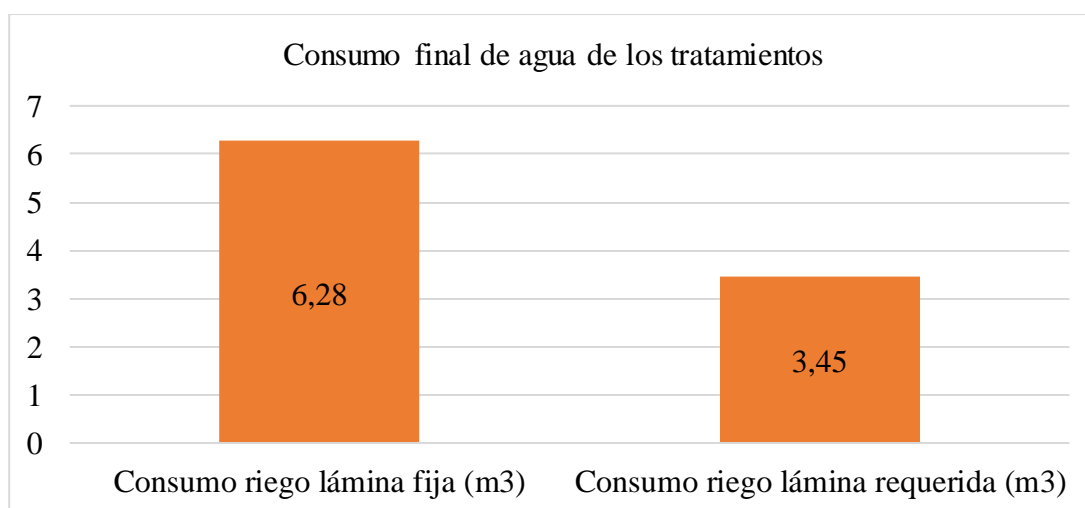


Figura 25. Gráfico de consumo total de agua por tratamientos. Fuente propia.

En el gráfico se aprecia una diferencia notable en los niveles de consumo, en el tratamiento de lámina fija se cuantificó un total de 6,3 m<sup>3</sup> y en el tratamiento de lámina requerida que se tiene un valor de 3,5 m<sup>3</sup>, lo que demuestra una gran diferencia de un tratamiento con respecto al otro, porcentualmente se obtuvo un ahorro de 44,8 % de con respecto de un tratamiento al otro por lo que se reduce el impacto ambiental, adicionalmente se podría reducir problemas por enfermedades fungosas y así evitar las aplicaciones de fungicidas que tanto afectan al medio ambiente.

Al final del proceso se compararon los niveles de consumo día con día donde se puede así explicar el porqué de la gran diferencia de metros cúbicos al final del proceso donde

se puede ver el tratamiento de consumo variable en naranja durante los 49 días de riego, los valores están muy por debajo del otro tratamiento, además el comportamiento es más irregular, esto se puede explicar por medio de los niveles de precipitación obtenidos durante todos los días, en las Figuras 26 y 27 se pueden comparar las coincidencias de la poca aplicación con los días donde hubo una medición alta de precipitación, ya que al tener el suelo lámina acumulada no es recomendable la aplicación de riego, esto según lo calculado en el balance hídrico explicado con anterioridad.

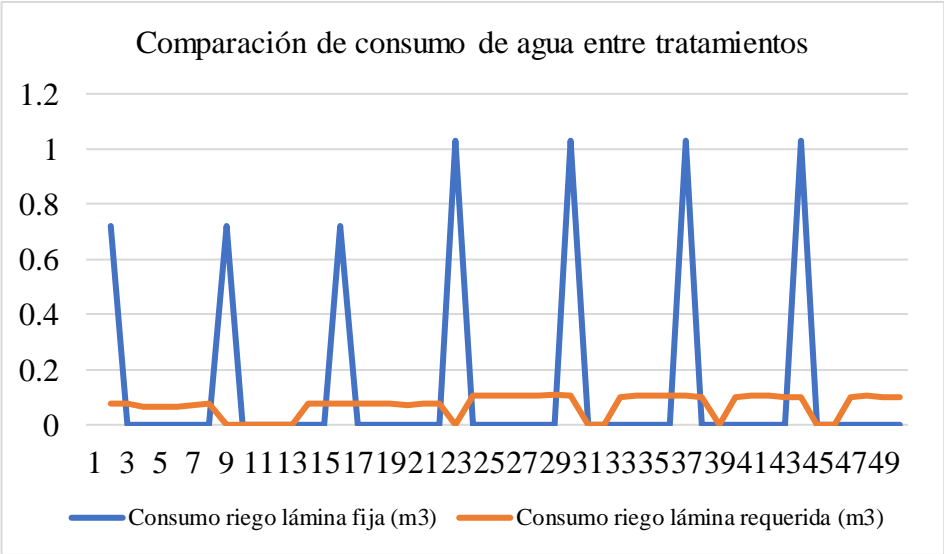


Figura 27. Gráfico de consumo diario de los tratamientos. Fuente propia.

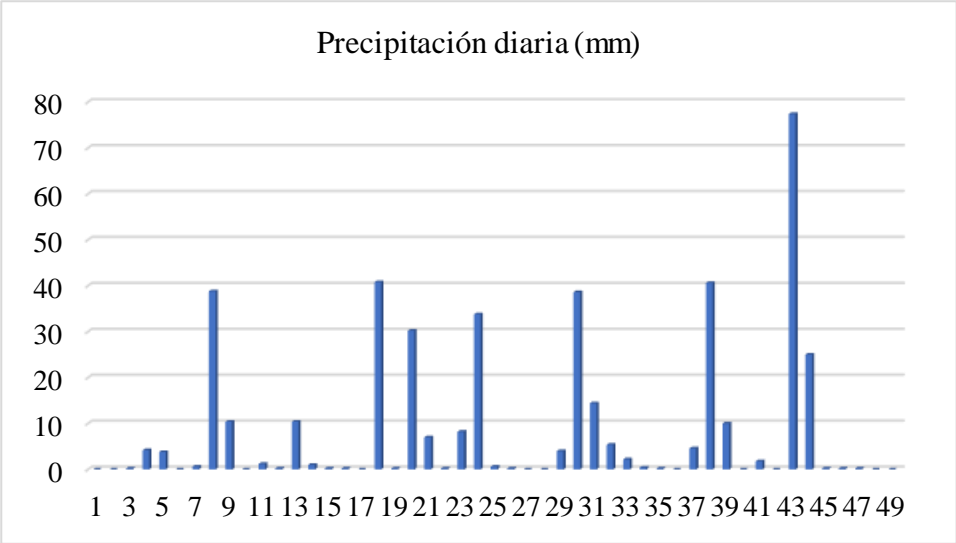


Figura 26. Gráfico de precipitaciones diarias. Fuente propia.

## 5.10 Análisis de muestreo y sensores

### Análisis de muestreo

El análisis de muestreo se empezó con la definición de la probabilidad según el análisis de varianza hecho para cada variable de muestreo, el resultado de dicho análisis se presenta en el Cuadro 14 donde se puede observar el valor de P para cada uno de los análisis, así como la hipótesis aceptada según lo definido en la metodología.

Cuadro 14. Valores de análisis de varianza.

<b>Variable medida</b>	<b>Valor de P</b>	<b>Hipótesis aceptada</b>
Peso de lechuga (g)	0,000012	Alternativa
Largo de hoja (cm)	7,6555	Nula
Ancho de hoja (cm)	5,3408	Nula
Largo de raíz (cm)	0,0196	Alternativa
Peso de raíz (g)	0,4058	Nula
Ancho de tallo (cm)	0,1821	Nula

Fuente: propia.

Se obtienen entonces según los valores de P dos variables donde hay una diferencia significativa y se acepta la hipótesis alternativa ya que los valores de P no exceden el 0,05 mencionado según se definió en el criterio del análisis de varianza por lo que a las variables de peso de la lechuga y largo de la raíz se les procede a realizar la prueba de Tukey para identificar entre cuales tratamientos hay diferencia estadísticamente hablando dentro las mediciones de muestreo, se adjunta en el anexo 6 los cuadros de mediciones realizados, entonces pese a encontrar diferencias en las demás variables cómo se muestra en el anexo 6 pues no son lo suficiente para indicar que existe alguna diferencia estadísticamente hablando.

En el caso de los resultados de la prueba de Tukey se obtuvieron los siguientes resultados que se mostrarán en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Relaciones según la prueba de Tukey.

	<b>Peso Lechuga</b>	<b>Largo de raíz</b>
<b>L. Requerida - L. Fija</b>	Significativa	
<b>L. Requerida - Control</b>	Significativa	
<b>L. Fija- Control</b>		Significativa

Fuente: propia.

Según los resultados de la prueba de Tukey hay diferencias significativas en el peso de la lechuga en el tratamiento de lámina requerida con el de lámina fija y control, entre estos dos últimos no hay diferencia considerable, revisando las mediciones y sus promedios concuerda bastante ya que porcentualmente el peso de las lechugas del tratamiento de lámina requerida es mucho mayor con aproximadamente un 35% más en el peso promedio por lo que si hay una relación directa con los valores debido a la diferencia de aplicación de lámina.

En la segunda variable solo hay una diferencia entre el método de lámina fija con el tratamiento control, el tratamiento de lámina requerida no presenta diferencias significativas con ninguno de los otros dos, con estos resultados se puede determinar constatando los promedios mostrados en el Cuadro 16 que las raíces en la cama control son las más largas, más no hay diferencia significativamente estadística con respecto al tratamiento de lámina requerida, solo con el de lámina fija que presenta los valores más bajos, por lo que no se puede determinar un patrón que indique alguna relación con los diferentes tratamientos.

Cuadro 16. Promedios de las variables medidas con diferencias significativas.

	<b>Promedio Peso de Lechuga (g)</b>	<b>Promedio de largo de Raíz (cm)</b>
<b>L. Requerida</b>	485,4	7,5
<b>L. Fija</b>	356,4	6,0
<b>Control</b>	352,7	7,8

Fuente: propia.

## Análisis de sensores

Para cada tratamiento se realizaron los gráficos respectivos para observar los comportamientos de los sensores, así como la concentración de mediciones que dictará el respectivo promedio por cada sensor.

### Sensores de humedad

Para los sensores de humedad se obtuvo el análisis de los valores según los tratamientos, en los siguientes gráficos se demuestran los respectivos gráficos de cajas para ver el valor de las medidas para cada sensor. En las Figuras 28, 29 y 30 se pueden observar los gráficos de los tres tratamientos.

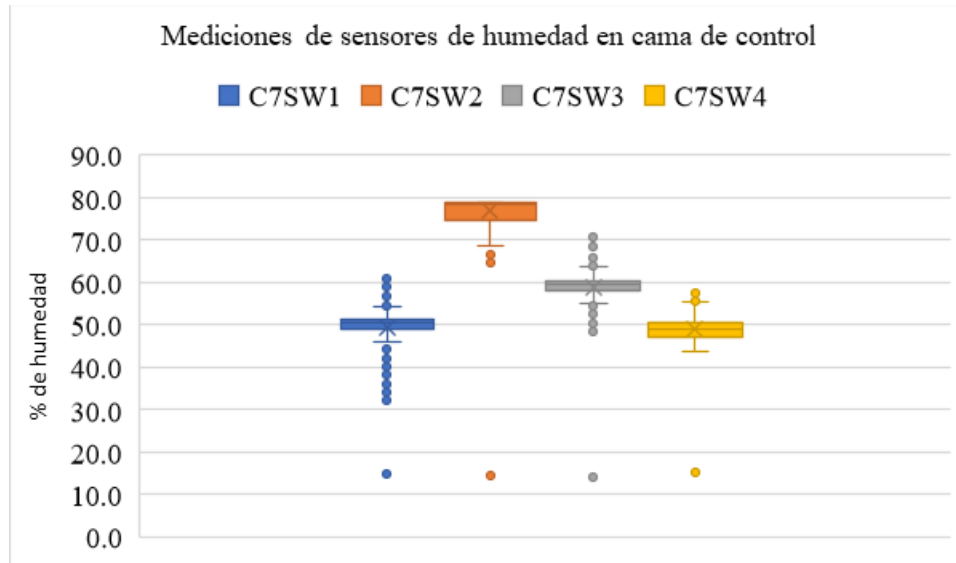


Figura 28. Gráfico de sensores de humedad para la cama de control. Fuente propia.

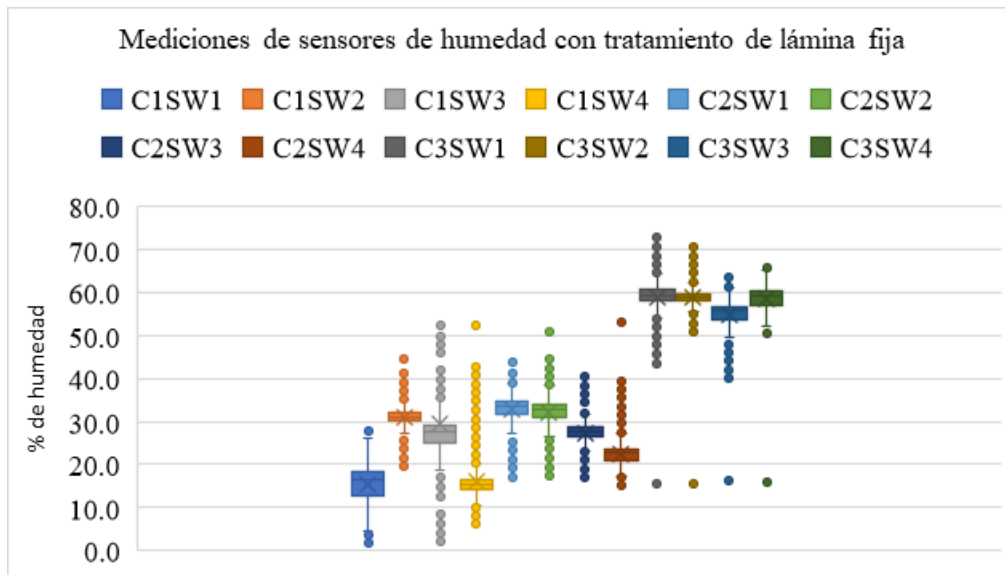


Figura 29. Gráfico de mediciones de los sensores de humedad para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.

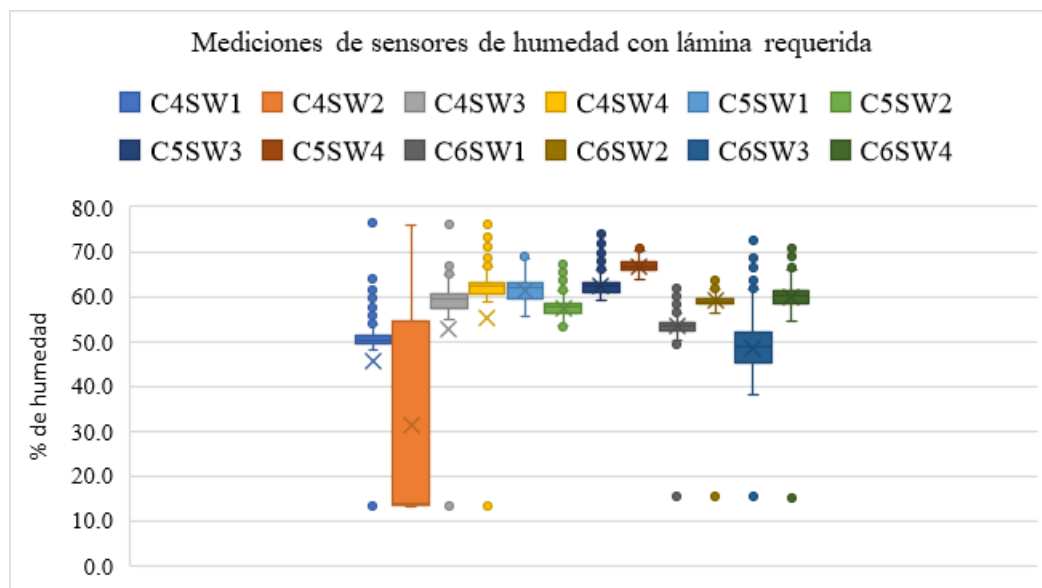


Figura 30. Gráfico de mediciones de sensores de humedad para el tratamiento de lámina requerida. Fuente propia.

Para el análisis de las mediciones se puede observar que los valores de los sensores del tratamiento de lámina requerida presentan medias con valores mayores que en su mayoría rondan entre el 60% y el 70%, en el gráfico del tratamiento de lámina fija se notan valores menores en las medias que rondan entre el 20% y el 40%, para finalizar el análisis de media se tiene la cama de control que cómo se puede apreciar en el gráfico se utilizaron menos

sensores, tienen medias con valores cercanos al 50%, cabe destacar que hay valores de sensores que tienen valores que distan bastante de las mediciones en la mayoría, esto se debe a que las mediciones dependerán en gran parte de la profundidad de los sensores que depende de la confección de la cama y el tipo de suelo.

En los Gráficos 31,32 y 33 se evaluarán los comportamientos de los sensores a lo largo del proceso.

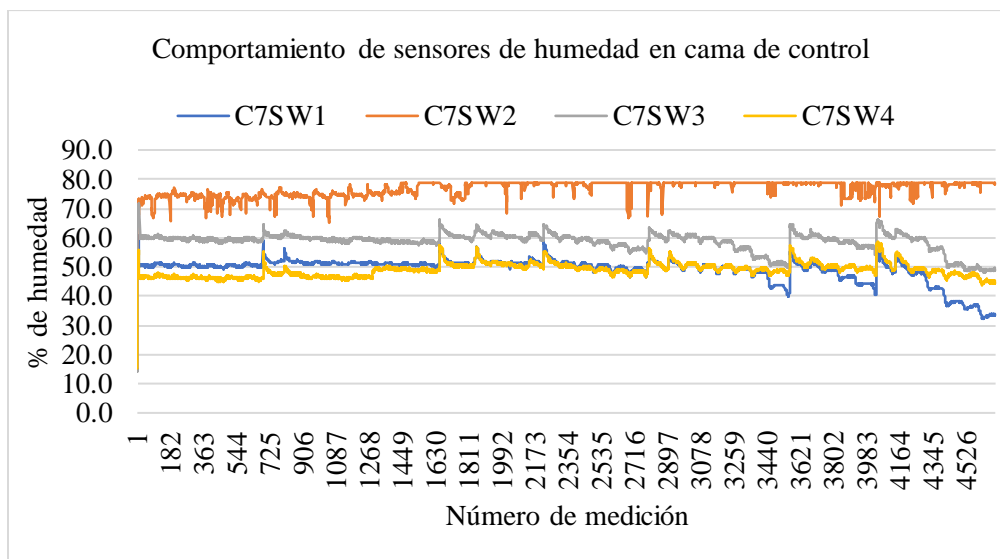


Figura 31. Gráfico de comportamiento de sensores de humedad para la cama de control. Fuente propia.

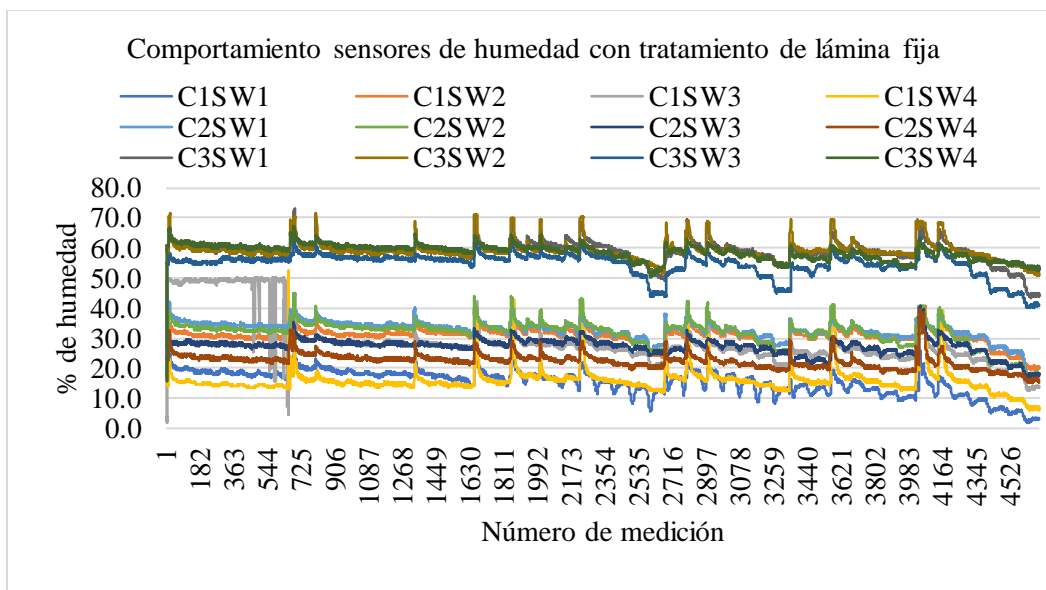


Figura 32. Gráfico de comportamiento de sensores de humedad para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.



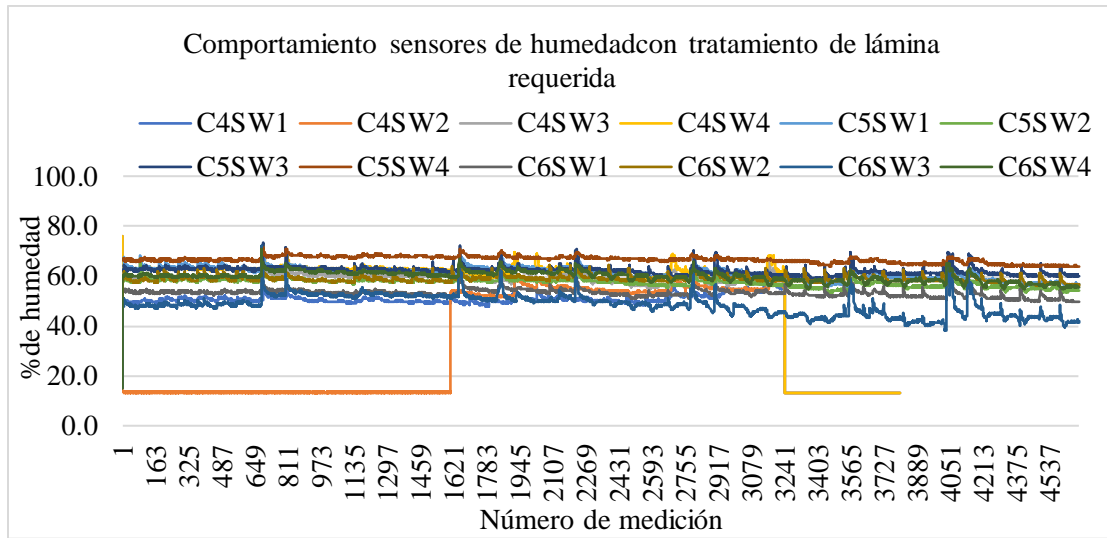


Figura 33. Gráfico de comportamiento de sensores de humedad para el tratamiento de riego requerida. Fuente propia.

El comportamiento de los sensores sigue un mismo patrón en los tres tratamientos entre sensores del mismo tratamiento, eso quiere decir que su funcionamiento fue correcto, sin embargo, se pueden apreciar dos sensores (C4SW2 y C4SW4) que presentaron fallas a lo largo de las mediciones, por eso se pueden ver valores tan bajos debido a que sus mediciones fueron afectada por una falla electrónica que impidió la medición correcta. Una vez que se obtuvo el comportamiento representativo de cada tratamiento por (valor y patrón) se pasó a hacer un análisis de resumido para ver el funcionamiento. En el Gráfico 34 se aprecian los comportamientos por tratamiento resumido. El resultado de los valores de tensión concuerda con los valores de humedad medidos con los Soilwatch 10 en el tratamiento de lámina requerida que fueron superlativos comparados con los demás tratamientos, los valores rondaron en su mayoría más del 60% de humedad volumétrica en el suelo.

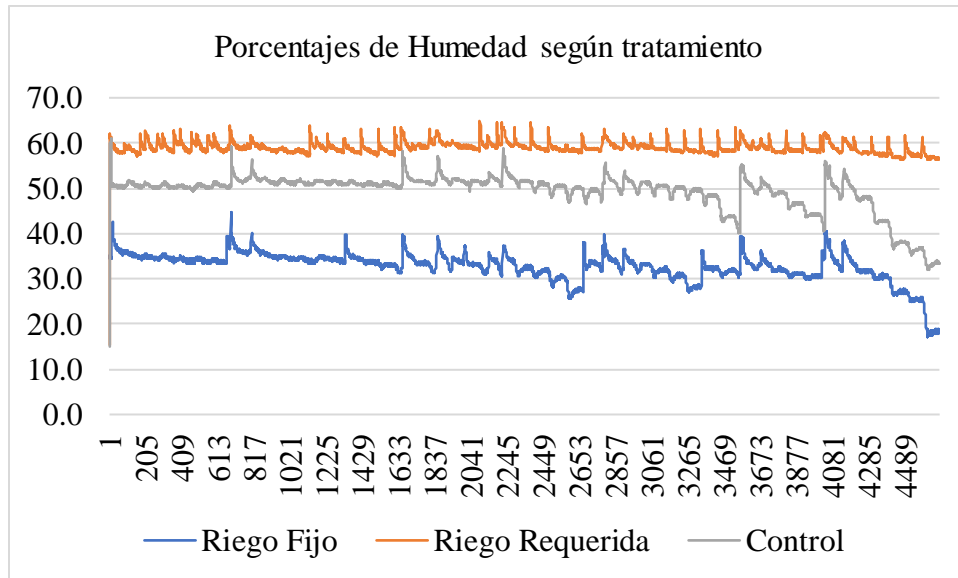


Figura 34. Porcentajes de humedad según tratamiento. Fuente propia.

En la apreciación del gráfico se pueden observar la diferencia en los comportamientos de los sensores, el tratamiento del riego con lámina requerida presenta menos irregularidades en la línea lo que significa menos cambios de humedad bruscos cómo se puede ver en lo otros dos tratamientos que hay grandes variaciones en los niveles de humedad principalmente de la mitad del proceso en adelante. Esta regularidad en el gráfico se traduce al final de cuentas en menos estrés hídrico para la planta al no tener recaídas de humedad tan altas, recordar que los cambios de bruscos de temperatura y humedad pueden generar problemas de enfermedades en las plantas.

### Sensores de tensión

Se presentan los Gráficos 35,36 y 37 con los datos de tensión con las mediciones de todos los puntos durante todos los días del proceso del cultivo. Los gráficos de caja muestran los valores de todas las medias, así como las medias de todos los sensores.

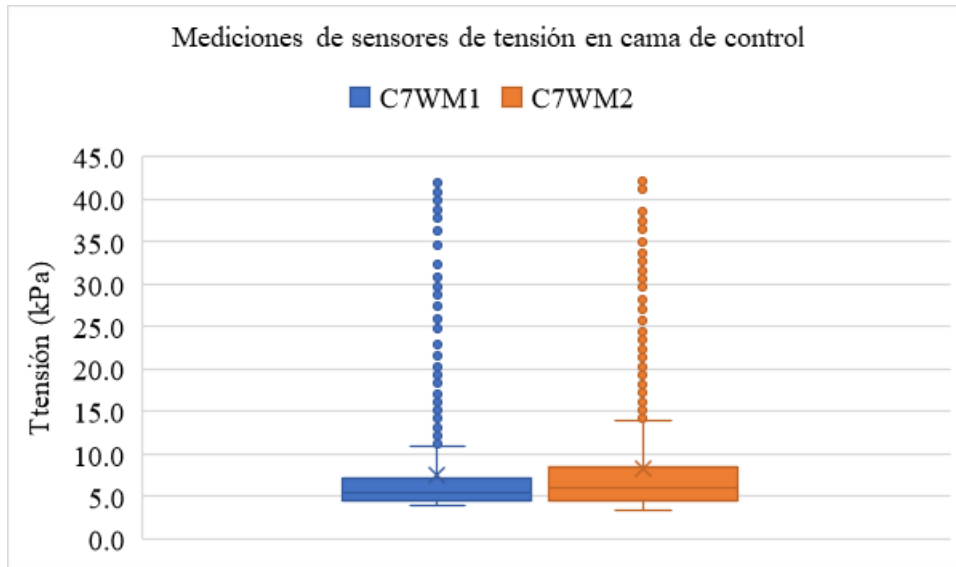


Figura 35.. Gráfico de mediciones de sensores de tensión en la cama de control. Fuente propia.

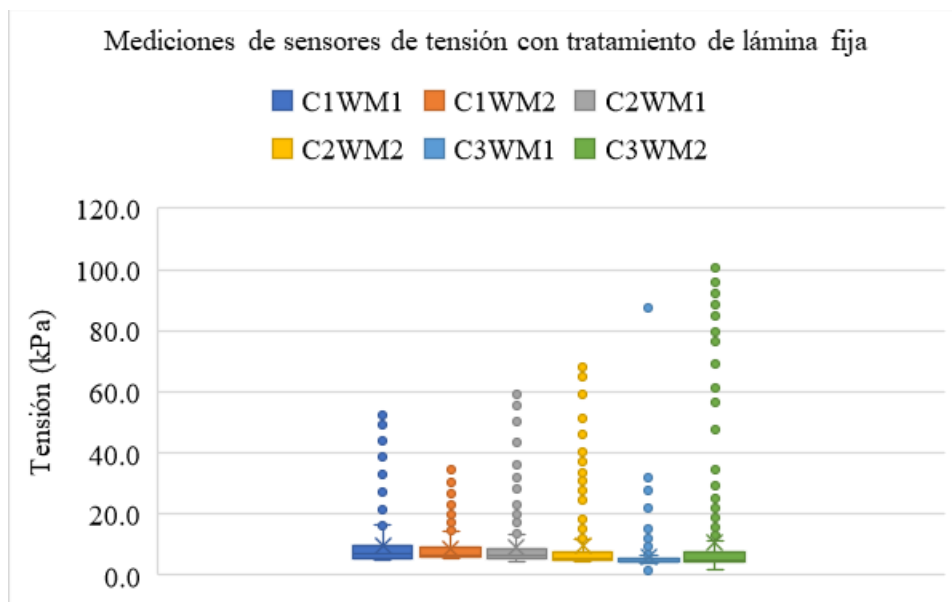


Figura 36. Gráfico de mediciones de sensores de tensión para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.

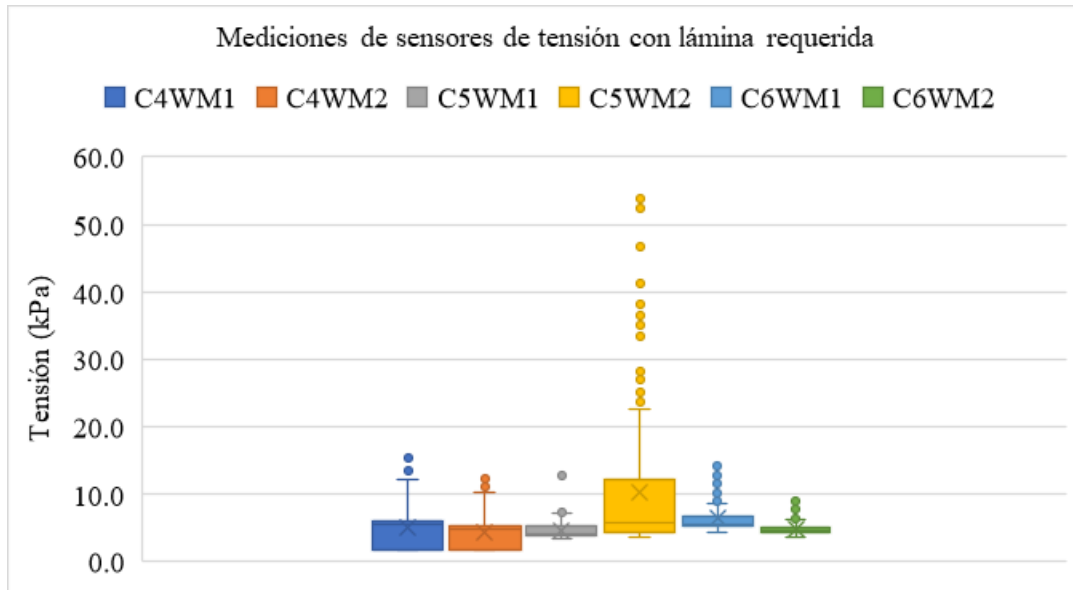


Figura 37. Gráfico de mediciones de sensores de tensión para el tratamiento de lámina requerida. Fuente propia.

Se pueden observar diferencias notables en las medias de los valores según los tratamientos. Entre más cercano a 0 sea el valor más humedecido se encuentra el suelo por lo que hay menos tensión, por el contrario, entre mayor tensión haya en el suelo los sensores captaron valores más grandes. En el gráfico del tratamiento de lámina fija se observan valores cercanos a 10 kPa, este valor es similar a los de la media observada en la cama de control, los valores que difieren en las mediciones son los del tratamiento de lámina requerida puesto que la media ronda los 5 kPa por lo que se reduce alrededor de un 50% la tensión en el suelo con respecto a los otros tratamientos, como análisis final también se pueden observar muchos puntos de medición por encima de los 20 kPa en la cama control, por lo que se puede decir que hay bastante irregularidad en este tratamiento.

Para observar un comportamiento de los sensores de tensión al igual que en el análisis anterior se utilizaron los sensores más representativos según la media obtenida. En la Figura 38 se puede observar cómo hay gran diferencia en los valores según los tratamientos, además de observar en la parte superior mediciones de niveles altos principalmente en la cama de control y el tratamiento de lámina fija, estos valores coinciden con las irregularidades del gráfico de humedad en los mismos tratamientos.

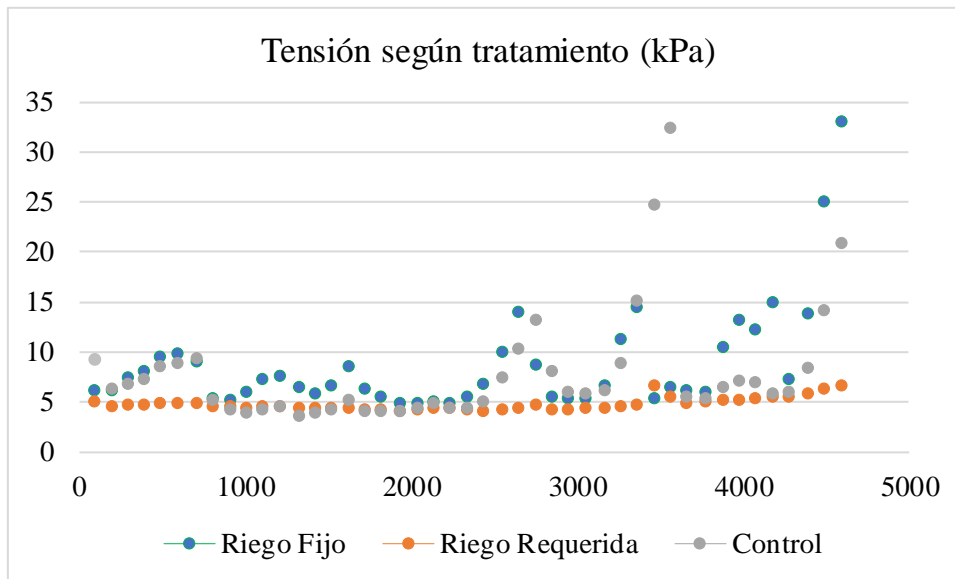


Figura 38. Gráfico de mediciones de tensión según el tratamiento. Fuente propia.

### 5.11 Análisis económico

Para obtener comparaciones a nivel económico se proyectaron ganancias por sembrar la misma cantidad de lechugas utilizadas en el proyecto de investigación una vez al año, se tomaron los pesos de los diferentes tratamientos y se promediaron para así poder comparar las ganancias generadas estimando las ventas por kilogramo, los datos de costos y de ganancias son estimaciones debido a que según la época pueden variar. El en Cuadro 17 se pueden ver los datos iniciales de costos y pesos tomados.

Cuadro 17. Datos importantes para el análisis económico.

Datos para el cálculo económico	Valores
Promedio Peso de lechuga lámina fija (g)	356,40
Promedio Peso de lechuga lámina requerido (g)	485,44
Precio por kilo (₡)	550
Costo de producción (₡)	75
Número de lechugas	1000

Fuente: propia.

Conocidos los datos se procedieron a estimar los flujos por los primeros tres años, así como la inversión inicial que es el equivalente al costo de producción por lechuga en las 1000 lechugas sembradas. Se utilizó el valor de interés recomendado por el INDER en la página oficial que es de 8%. En los Cuadros 18 y 19 se exponen los resultados obtenidos tanto para el VAN cómo para el TIR que estiman la rentabilidad del proyecto en el futuro.

Cuadro 18. Resultados del análisis económico para el tratamiento de lámina requerida. Fuente propia.

Valores de tratamiento de Lámina Requerida	Valores
Tasa Interés Proyecto Agrícola	8%
Inversión Inicial	-C 225.000
Flujo año 1	C 266.993
Flujo año 2	C 266.993
Flujo año 3	C 266.993
VAN	C 463.066,64
TIR	105%

Cuadro 19. Resultados del análisis económico para el tratamiento de lámina fija. Fuente propia.

Valores de tratamiento de Lámina Fija	Valores
Tasa Interés Proyecto Agrícola	8%
Inversión Inicial	-C 225.000
Flujo año 1	C 196.020
Flujo año 2	C 196.020
Flujo año 3	C 196.020
VAN	C 280.162,55
TIR	69%

Comparando los valores obtenidos se puede observar una diferencia considerable del tratamiento de lámina requerida con el de lámina fija, las principales diferencias se dan en los ingresos por lo que se refleja en los flujos de caja de los primeros tres años, específicamente se obtuvo una diferencia de C182,904.09 en el VAN y de 36% en el TIR por lo que hay una gran diferencia de un tratamiento al otro. Se puede atribuir el aumento de los índices de rentabilidad a la diferencia de peso que hubo de una cama a otra.

## **6.CONCLUSIONES**

Con respecto a los objetivos fijados en el proyecto se obtuvieron las siguientes conclusiones.

1. El tratamiento de lámina requerida redujo el consumo de agua un 44,8% en comparación con el tratamiento de lámina fija, por lo que el impacto por su huella hídrica es mucho menor.
2. Se encontraron diferencias de un tratamiento a otro en la variable “peso de lechuga” donde se observó un aumento de peso de un 35% en el tratamiento por lámina requerida con respecto al promedio de peso más cercano que fue el tratamiento de lámina fija. En cuanto al largo de la raíz se obtuvo una diferencia significativa entre el largo de la cama de control y el tratamiento de la lámina fija, siendo la cama de control la que presentó los mayores valores de largos de raíz.
3. En las variables de peso de raíz, largo y ancho de hoja y ancho de tallo, aunque se encontraron diferencias en los promedios según las pruebas estadísticas no hay diferencias significativas por lo que no se puede asegurar que los tratamientos determinen un comportamiento en el desarrollo de dichas variables.
4. En cuanto a rendimiento económico el tratamiento con mejores proyecciones fue el de lámina requerida con un valor de VAN y TIR de ¢ 463.066,64 y 105% que está por muy por encima del tratamiento de lámina fija que obtuvo valores de ¢ 280.162,55 y 69% respectivamente.
5. El tratamiento que menos irregularidades tuvo en el comportamiento de los sensores de humedad es el que reportó mayor peso en la producción (tratamiento lámina requerida de riego). El tratamiento de lámina requerida presentó valores más bajos de tensión de humedad, lo que concuerda con la teoría de que un suelo con más disposición de agua presenta valores de tensión entre rangos de 0 kPa a 5 kPa.



## **7. RECOMENDACIONES**

Para realizar una mejor medición del volumen de agua consumido por tratamientos se podría incorporar al equipo de riego dos caudalímetros con el fin de obtener una estimación más precisa.

Se aconseja llevar a cabo este tipo de pruebas en suelos de mejores condiciones físicas puesto que en suelos desgastados se pueden experimentar complicaciones para mediciones de infiltración, por ejemplo.

Se recomienda realizar la prueba de la metodología en diferentes tipos de suelo para así confirmar los resultados y el comportamiento en diferentes medios.

## 8. ANEXOS

Anexo 1. Valores de coeficiente de crecimiento. Fuente: (FAO, 2006)

CUADRO 12

Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo,  $K_c$  y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ( $HR_{\text{máx}} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$ ) para usar en la fórmula de la FAO Penman-Monteith  $ET_c$ .

Cultivo	$K_{c, \text{inicial}}$ <sup>1</sup>	$K_{c, \text{maduro}}$	$K_{c, \text{fin}}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
<b>a. Hortalizas Pequeñas</b>	<b>0,7</b>	<b>1,05</b>	<b>0,95</b>	
Brécol (Brócoli)		1,05	0,95	0,3
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,4
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Coliflor		1,05	0,95	0,4
Apio (Céleri)		1,05	1,00	0,6
Ajo		1,00	0,70	0,3
Lechuga		1,00	0,95	0,3
Cebolla – seca		1,05	0,75	0,4
– verde		1,00	1,00	0,3
– semilla		1,05	0,80	0,5
Espinaca		1,00	0,95	0,3
Rábano		0,90	0,85	0,3
<b>b. Hortalizas– Familia de la Solanáceas</b>	<b>0,6</b>	<b>1,15</b>	<b>0,80</b>	
Berenjena		1,05	0,90	0,8
Pimiento Dulce (campana)		1,05 <sup>2</sup>	0,90	0,7
Tomate		1,15 <sup>2</sup>	0,70–0,90	0,6
<b>c. Hortalizas– Familia de las Cucurbitáceas</b>	<b>0,5</b>	<b>1,00</b>	<b>0,80</b>	
Melón	0,5	0,85	0,60	0,3
Pepino – Cosechado Fresco	0,6	1,00 <sup>2</sup>	0,75	0,3
– Cosechado a Máquina	0,5	1,00	0,90	0,3
Calabaza de Invierno		1,00	0,80	0,4
Calabacín (zucchini)		0,95	0,75	0,3
Melón dulce		1,05	0,75	0,4
Sandía	0,4	1,00	0,75	0,4
<b>d. Raíces y Tubérculos</b>	<b>0,5</b>	<b>1,10</b>	<b>0,95</b>	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80 <sup>3</sup>	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4
Patata o Papa		1,15	0,75 <sup>4</sup>	0,6
Camote o Batata		1,15	0,65	0,4
Nabos (Rutabaga)		1,10	0,95	0,6
Remolacha Azucarera	0,35	1,20	0,70 <sup>5</sup>	0,5

<sup>1</sup> Estos son valores generales de  $K_{c, \text{inicial}}$  considerando un manejo típico del riego y humedecimiento del suelo. Para humedecimientos frecuentes, tal como en el caso de riego por aspersión de alta frecuencia o lluvia diaria, estos valores pueden aumentar sustancialmente pudiendo acercarse a 1,0 a 1,2. El valor de  $K_{c, \text{inicial}}$  es una función del intervalo de humedecimiento y la tasa potencial de evaporación durante las etapas inicial y de desarrollo del cultivo, siendo estimado con mayor exactitud a través de las Figuras 29 y 30, o la Ecuación 7-3 del Anexo 7, o usando el coeficiente dual  $K_{c, \text{inicial}} + K_e$ . Utilice el valor de  $K_{c, \text{inicial}}$  para el grupo cuando no aparece un valor de  $K_{c, \text{inicial}}$  para el cultivo.

<sup>2</sup> En algunas oportunidades, los Frijoles o Judías, Guisantes, Leguminosas, Tomates, Pimientos y Pepinos son cultivados utilizando empalizadas que alcanzan los 1,5 a 2 metros de altura. En estos casos es necesario incrementar los valores de  $K_c$ . Para frijoles o judías verdes, pimentones y pepinos se puede asumir un valor de 1,15 y en el caso de los tomates, frijoles secos y los guisantes, de 1,20. Bajo esas condiciones también debe aumentarse el valor de h.

<sup>3</sup> Los valores correspondientes a la etapa de mediados de temporada para la mandioca, asumen condiciones de no-estrés durante o después de la temporada lluviosa. Los valores de  $K_{c, \text{fin}}$  toman en cuenta el letargo durante la estación seca.

<sup>4</sup> El valor de  $K_{c, \text{fin}}$  para papas o patatas de ciclo largo con rotura de los estolones es alrededor de 0,40.

<sup>5</sup> El valor de  $K_{c, \text{fin}}$  corresponde a condiciones sin riego durante el último mes de la temporada productiva. El valor de  $K_{c, \text{fin}}$  para la remolacha azucarera es mayor, hasta 1,0, cuando ocurra riego o lluvias significativas durante el último mes.

Anexo 10. Valores agotamiento y profundidad radicular. Fuente: (FAO, 2006)

Cultivo	Profundidad radicular máxima <sup>1</sup> (m)	Fracción de agotamiento <sup>2</sup> (para ET = 5 mm día <sup>-1</sup> ) p	
<b>a. Hortalizas Pequeñas</b>			
Brócoli	0,4-0,6	0,45	
Col de Bruselas	0,4-0,6	0,45	
Repollo	0,5-0,8	0,45	
Zanahorias	0,5-1,0	0,35	
Coliflor	0,4-0,7	0,45	
Apio (Céleri)	0,3-0,5	0,20	
Ajo	0,3-0,5	0,30	
Lechuga	0,3-0,5	0,30	
Cebolla	- seca - verde - semilla	0,3-0,6 0,3-0,6 0,3-0,6	0,30 0,30 0,35
Espinaca	0,3-0,5	0,20	
Rábano	0,3-0,5	0,30	
<b>b. Hortalizas – Familia de la Solanáceas</b>			
Berenjena	0,7-1,2	0,45	
Pimiento Dulce (campana)	0,5-1,0	0,30	
Tomate	0,7-1,5	0,40	
<b>c. Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas</b>			
Melón	0,9-1,5	0,45	
Pepino	- cosechado fresco - cosechado a máquina	0,7-1,2 0,7-1,2	0,50 0,50
Calabaza de Invierno	1,0-1,5	0,35	
Calabacín (zucchini)	0,6-1,0	0,50	
Melón dulce	0,8-1,5	0,40	
Sandía	0,8-1,5	0,40	
<b>d. Raíces y Tubérculos</b>			
Remolacha, mesa	0,6-1,0	0,50	
Yuca o Mandioca	- año 1 - año 2	0,5-0,8 0,7-1,0	0,35 0,40
Chirivía	0,5-1,0	0,40	
Papa o patata	0,4-0,6	0,35	
Camote o Batata	1,0-1,5	0,65	
Nabos (y Rutabaga)	0,5-1,0	0,50	
Remolacha Azucarera	0,7-1,2	0,55 <sup>3</sup>	

<sup>1</sup> Los valores mayores de Z, son para suelos que no posean capas u otras características que puedan restringir el desarrollo radicular. Los valores menores de Z, pueden ser usados para calendarios de riego y los valores mayores para simular condiciones de estrés hídrico o para condiciones de cultivos de secano.

<sup>2</sup> Los valores de p son validos para ET<sub>c</sub> = 5 mm día<sup>-1</sup>. El valor de p puede ser ajustado para diferentes valores de ET, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$p = p_{\text{cuando } Z} + 0,04 (5 - ET_c)$$

donde p está expresado como una fracción y ET<sub>c</sub>, en mm día<sup>-1</sup>.

<sup>3</sup> Con frecuencia la remolacha azucarera experimenta cierto marchitamiento al final de la tarde en climas áridos y con valores de p < 0,55, con poco impacto en la producción de azúcar.

Anexo 19. Etapas de crecimiento. Fuente: (FAO, 2006)

**CUADRO 11**  
**Duración de las etapas de crecimiento\* del cultivo**  
**para distintos períodos de siembra y regiones climáticas (días)**

Cultivo	Inic. (L <sub>in</sub> )	Des. (L <sub>fin</sub> )	Med (L <sub>med</sub> )	Final (L <sub>fin</sub> )	Total	Fecha de Siembra	Región
<b>a. Hortalizas Pequeñas</b>							
Brécol (Brócoli)	35	45	40	15	135	Sept.	Calif. Desierto, EU
Repollo	40	60	50	15	165	Sept.	Calif. Desierto, EU
Zanahoria	20	30	50/30	20	100	Oct/Ene.	Clima Árido
	30	40	60	20	150	Feb/Mar.	Mediterráneo
	30	50	90	30	200	Oct.	Calif. Desierto, EU
Coliflor	35	50	40	15	140	Sept.	Calif. Desierto, EU
Apio (Céleri)	25	40	95	20	180	Oct.	(Semi)Árido
	25	40	45	15	125	Abril	Mediterráneo
	30	55	105	20	210	Ene.	(Semi)Árido
Crucíferas <sup>1</sup>	20	30	20	10	80	Abril	Mediterráneo
	25	35	25	10	95	Febrero	Mediterráneo
	30	35	90	40	195	Oct/Nov.	Mediterráneo
Lechuga	20	30	15	10	75	Abril.	Mediterráneo
	30	40	25	10	105	Nov/Ene.	Mediterráneo
	25	35	30	10	100	Oct/Nov.	Región Árida
	35	50	45	10	140	Feb.	Mediterráneo
Cebolla (seca)	15	25	70	40	150	Abril	Mediterráneo
	20	35	110	45	210	Oct; Ene.	Región Árida; Calif.
Cebolla (verde)	25	30	10	5	70	Abril/Mayo	Mediterráneo
	20	45	20	10	95	Octubre	Región Árida
	30	55	55	40	180	Marzo	Calif., EU
Cebolla (semilla)	20	45	165	45	275	Sept.	Calif. Desierto, EU
Espinaca	20	20	15/25	5	60/70	Abr; Sep/Oct	Mediterráneo
	20	30	40	10	100	Noviembre	Región Árida
Rábano	5	10	15	5	35	Mar/Abr.	Medit.; Europa
	10	10	15	5	40	Invierno	Región Árida
<b>b. Hortalizas – Familia de las Solanáceas</b>							
Berenjena	30	40	40	20	130/140	Octubre	Región Árida
	30	45	40	25		May/Junio	Mediterráneo
Pimiento Dulce (campana)	25/30	35	40	20	125	Abril/Junio	Europa y Medit.
	30	40	110	30	210	Octubre	Región Árida
Tomate	30	40	40	25	135	Enero	Región Árida
	35	40	50	30	155	Abr/Mayo	Calif., EU
	25	40	60	30	155	Enero	Calif. Desierto, EU
	35	45	70	30	180	Oct/Nov.	Región Árida
	30	40	45	30	145	Abril/Mayo	Mediterráneo
<b>c. Hortalizas - Familia de las Cucurbitáceas</b>							
Melón	30	45	35	10	120	Enero	Calif., EU
	10	60	25	25	120	Ago.	Calif., EU
Pepino	20	30	40	15	105	Junio/Ago.	Región Árida
	25	35	50	20	130	Nov; Feb.	Región Árida
Calabaza de Invierno	20	30	30	20	100	Mar, Ago.	Mediterráneo
	25	35	35	25	120	Junio	Europa
Calabacín (zucchini)	25	35	25	15	100	Abr; Dic.	Medit.; Reg. Árida
	20	30	25	15	90	May/Junio	Medit.; Europa

\* Las duraciones de las etapas de crecimiento presentadas en este Cuadro son indicativas de condiciones generales, pudiendo variar significativamente de región a región, con las condiciones climáticas y de cultivo, y con la variedad del cultivo. Se recomienda al usuario obtener información local apropiada.

<sup>1</sup> Las crucíferas incluyen repollo, coliflor, brócoli y col de Bruselas. El amplio rango de duraciones de la temporada productiva es debido a diferencias en variedades y especies.

Anexo 28. Análisis químico completo de suelo (parte 1). Fuente propia.



CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN  
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES  
**REPORTE DE ENSAYO**  
RE-R01 (V2)

<b>N° DE REPORTE:</b>	<b>75178</b>		
USUARIO:	AUGE		
SUBCLIENTE	NARIME - UCR		
RESPONSABLE:	FEDERICO MONTERO RAMIREZ		
CORREO	fjmr1397@gmail.com		
TELÉFONO:	8420-4000		
		ANÁLISIS:	QC,CN
PROVINCIA:	CARTAGO	FECHA RECEPCIÓN:	04/09/2020
CANTÓN:	CARTAGO	EMISIÓN DE REPORTE:	09/09/2020
LOCALIDAD	ORIENTAL	N° DE MUESTRAS TOTAL:	1
CULTIVO:	SIN CULTIVO	PÁGINA:	1/2

**ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS**

Solución Extractora:		pH	cmol(+)/L					%	mg/L				
KCl-Olsen Modificado			H2O	ACIDEZ	Ca	Mg	K		CICE	SA	P	Zn	Cu
ID USUARIO	ID LAB	5,5	0,5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5
CAMPO DEL ITCR	S-20-03824	5,9	0,12	8,06	4,19	0,74	13,11	0,9	4	6,3	14	85	21

-----ÚLTIMA LÍNEA-----

Los valores debajo de cada elemento corresponden con los Niveles Críticos generales para la solución extractora usada

CICE=Capacidad de Intercambio de Catones Efectiva=Acidez+Ca+Mg+K

SA=Porcentaje de Saturación de Acidez=(Acidez/CICE)\*100

Anexo 36. Análisis químico completo de suelo (parte 2). Fuente propia.



CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN  
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES  
**REPORTE DE ENSAYO**  
RE-R01 (V2)

Nº DE REPORTE:	<b>75178</b>	ANÁLISIS:	QC,CN
USUARIO:	AUGE	FECHA RECEPCIÓN:	04/09/2020
SUBCLIENTE	NARIME - UCR	EMISIÓN DE REPORTE:	09/09/2020
RESPONSABLE:	FEDERICO MONTERO RAMIREZ	Nº DE MUESTRAS TOTAL:	1
CORREO	fjmr1397@gmail.com	PÁGINA:	2/2
TELÉFONO:	8420-4000		
PROVINCIA:	CARTAGO		
CANTÓN:	CARTAGO		
LOCALIDAD	ORIENTAL		
CULTIVO:	SIN CULTIVO		

**ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS**

		mS/cm	%		Relación
		CE	C	N	C/N
<b>ID USUARIO</b>	<b>ID LAB</b>	1,5			
CAMPO DEL ITCR	S-20-03824	0,1	2,29	0,23	10,0

—ULTIMA LINEA—

OBSERVACIÓN: El % C y N totales se determinaron con el Autoanizador de C/N por combustión seca. Los valores de % C total correlacionan muy bien ( $R^2 \geq 0,95$ ) con el % de MO. Si quiere estimar el valor del % MO a partir del dato de % C total determinado con esta metodología, multiplique el % C total por 1,43.

Anexo 40. Mediciones de variables de lechugas. Fuente propia.

Ca ma	Número de Lechuga	Largo Hoja de Lechuga (cm)	Ancho Hoja de Lechuga (cm)	Largo Raíz de lechuga (cm)	Peso Total (g)	Peso Raíz (g)	Peso lechuga sin raíz (g)	An ch o de tall o (c m)
1	1	22	15	7	339.9	8.4	331.5	2.3
		21	15					
		25	18.5					
	2	17	13.5	6	214.2	7.3	206.9	1.3
		17	14					
		20	14					
	3	15	12	5.5	306.9	12	294.9	1.5
		17.5	15					
		21	14.5					
	4	15	14	5.5	321.1	13.3	307.8	1.8
		19.8	17					
		18.5	17					
2	1	18	16	7	229.9	13.5	216.4	2.1
		20	17.5					
		20	16.5					
	2	21	17	7	436.6	18.7	417.9	2.2
		20	16					
		20	18					
	3	19	18	8	426	26	400	3
		19	19.5					
		16.5	16					
	4	18.5	16	6	333.1	20.1	313	2.6
		17.5	13					
		19	15					
3	1	22	19	6.5	375.8	16.5	359.3	2.3
		19.5	18					
		22.5	18.5					
	2	18.5	14	7	321.4	16.5	304.9	2
		16.5	17					
		21	17					
	3	20	14	4	259	12.7	246.3	2
		18.5	15					
		17	17					
	4	18	16	4.5	332.7	7.6	325.1	1.3
		15	18					



		17	14					
4	1	21	16	6.5	508	16.2	491.8	1.6
		21	19.5					
		22	18					
	2	23	17.5	5.5	338.6	12.4	326.2	2.3
		20	16					
		21	16					
	3	22	15	5.7	382.8	9.7	373.1	1.6
		23.7	18					
		24.2	18					
	4	23.7	19.7	7	500.3	16.4	483.9	2.3
		21.5	18					
		23	15.7					
5	1	18	18	8.5	568	15.5	552.5	1.8
		17.5	16					
		20.5	17					
	2	23.5	19	7.4	500.5	16.9	483.6	2.6
		19.5	17.5					
		25	18					
	3	20.7	18.5	5.3	447.1	13.6	433.5	1.5
		19	17					
		19	15					
	4	20	20.3	8	554.1	15.7	538.4	1.7
		16.5	16.5					
		15.5	15.7					
6	1	15.5	17	9	454.4	16.1	438.3	1.8
		17.3	15.5					
		14.5	16					
	2	22	18	5.6	452.3	17.6	434.7	2.3
		20.5	16					
		18.2	14.5					
	3	22.8	18.5	10.5	528.2	17.7	510.5	1.8
		21.2	20					
		19.5	19					
	4	20.5	19	11	591	27.5	563.5	2.3
		17.8	18					
		21	18					
7	1	15	11.5	9	437.4	16.8	420.6	2.1
		17	18					
		16	16					
	2	16.5	11.5	7	233.2	12.9	220.3	1.6
		14	10.5					
		15	11.5					

3	18	15	7	381.5	16.3	365.2	1.6
	19	15					
	18	14.5					
4	1	14	8	358.5	20.5	338	1.7
	17.5	16.5					
	19.5	13					

## 9.BIBLIOGRAFIA

- Alfaro Santamaría, M. (2011). *Utilización del balance energético en la evaluación de la sostenibilidad ecológica del cultivo de lechuga (Lactuca sativa) en campo abierto y bajo invernadero en cartago, costa rica*. Universidad Estatal a Distancia Vicerectoría Académica.
- Alvarado, A., & Forsythe, W. (s.f.). *Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica*. Recuperado de [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)
- Angeles, V., Fernández, V., Khalidou, B., & Díaz, C. (2002). *Elementos básicos de riego presurizado para productores*. 228.
- Antonio, J., Sanz, O., Del, M., Hiraldo, C. M., María, C., & Castaño, R. (s.f.). *Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas*.
- Bakieva, M., Such, J., & Jornet, J. (2010). SPSS: ANOVA de un factor. *Universidad de Valencia: Grupo de Innovación Educativa*, 1–7.
- Calvo-solano, O. D., Hidalgo, H., & Gotlieb, Y. (2018). *Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco [Impacts of drought in the primary sector of the Central American Dry Corridor]*. 29(3), 695–709.  
<https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.30828>
- Chartuni, E., Carvalho, F. D. A. De, Marçal, D., & Ruz, E. (2007). Nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria. *Tecnología e Innovación, II*, 24–31.
- CLIMWAT - Climatic Database to be used with CROPWAT | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). Recuperado Enero 5, 2021, de <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026544/>
- Diseños en bloques completos al azar*. (s.f.).
- Enciso, J. M., Porter, D., & Périès, X. (s.f.). *Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego*.
- Erias, A., & Alvarez, M. (2008). *Relaciones entre la evaluación de impacto ambiental, la evaluación ambiental estratégica y el desarrollo sostenible: evolución, metodología y agentes participantes*.

- FAO. (2006). Evapotranspiración del Cultivo. *Serie Didáctica, Facultad de Agronomía y Zootécnica, Universidad Nacional de Tucumán*, 45.
- Fors, M. (2014). Análisis de varianza. *Revista Chilena de Anestesia*, 43(4), 306–310.  
Retrieved from [http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis\\_de\\_varianza\\_2012.pdf](http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012.pdf)
- Gil, E. (2016). Situación actual y posibilidades de la agricultura de precisión. *Actual Problems of Economics*, 183(9), 417–428. Recuperado de <https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=94023/2010/1/53733/28038-3962.pdf>
- González, L. (s.f.). Pequeños agricultores aprenden a mejorar sus ingresos cuidando al medio ambiente. Recuperado Setiembre 27, 2020, de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2012/08/03/agricultores-mejoran-ingresos-y-cuidan-medio-ambiente>
- Hidr, T., & INTA EEA San Juan Ing Agr Nicolás Ciancaglini-Prosap, I. (s.f.). *R-001-Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico*.
- Inder. (2016). Región Central, caracterización del territorio Cartago-Oreamuno-El Guarco-La Unión.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo. (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Atlas Estadístico Agropecuario*. Recuperado de [https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/01.\\_atlas\\_estadistico\\_agropecuario\\_2014.pdf](https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/01._atlas_estadistico_agropecuario_2014.pdf)
- Irrrometer Sensors. (s.f.). Recuperado Setiembre 23, 2020, de <https://www.irrometer.com/sensors.html#wm>
- Katzy O'neal Coto. (s.f.). Costa Rica enfrentó 134 conflictos por el agua en una década. Recuperado Setiembre 4, 2020, de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/03/27/costa-rica-enfrento-134-conflictos-por-el-agua-en-una-decada.html>
- Lanfranco, J. W., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. (2014). *Contenidos de Edafología Génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo*. Recuperado de [www.editorial.unlp.edu.ar](http://www.editorial.unlp.edu.ar)
- Liotta, M. (2015). Guía para la asistencia Técnica Agrícola de Nayarit. *Inta*, 15.  
Recuperado de

- [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_manual\\_riego\\_por\\_goteo.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf)file:///C:/Users/SURI/OneDrive/Documentos/inta\_manual\_riego\_por\_goteo.pdf
- López, M. (2011). *Diseño de un sistema de riego con viajero autopropulsado en la finca mona, compañía palma tica, Quepos. Martín.*
- Manual para la evaluación de huella hídrica.* (2002). 44. Recuperado de <http://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>
- Mete, M. R. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Fides et radio*, 7.
- MINI DISK INFILTROMETER | Hydraulic Conductivity in the Field | METER Environment. (s.f.). Recuperado Setiembre 26, 2020, de <https://www.metergroup.com/environment/products/mini-disk-infiltrometer/>
- Ministerio de Agricultura, G. y P. (2013). *Sistemas Olivícolas Familiares del centro-oeste del Valle del Tulúm Capacitación técnica: Riego por goteo en Olivo.* Mendoza.
- Mounzer, O., Montes, P., Baviera, B., Pedrero, F., & Alarcón, J. J. (s.f.). *Riego de precisión: herramientas y manejo indicadores.* 470–474.
- Muñoz, M. P. (s.f.). *VAN y TIR.* 4. Recuperado de <http://www.mpuga.com/Docencia/Fundamentos de Finanzas/Van y Tir 2011.pdf>
- Navarro, J. R., & Vargas, J. C. (2015). *Eficiencia relativa del diseño de bloques completos al azar para ensayos de arroz en Bagaces , Guanacaste , Costa Rica [Relative efficiency of the randomized complete block design for rice trials in].* XVI, 1–9.
- Quesada Rodríguez, J. (2017). *Instituto Tecnológico de Costa Rica Vicerrectoría de Docencia Escuela de Ingeniería Agrícola Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Ingeniería Agrícola Determinación de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la zona norte Cartago.*
- Saavedra Del R, G. R., Corradini, F., Antúnez, A., Elmer, S., Estay, P., & Sepulveda, P. (2017). *Manual de Producción de lechuga.*
- Sivakumar, B. (2011). Crise de l'eau: Du conflit à la coopération-un tour d'horizon. *Hydrological Sciences Journal*, 56(4), 531–552. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.580747>
- SoilWatch 10 - Soil Moisture Sensor - PINO-TECH. (s.f.). Recuperado Setiembre 23, 2020, de <https://pino-tech.eu/soilwatch10/>

- Theodoracopoulos, M., Lardizabal, R., & Arias, S. (2009). *Producción de lechuga*. Recuperado de [www.hondurasag.org](http://www.hondurasag.org)
- Vasquez, A., Vasquez, I., Vasquez, C., & Cañamero, M. (2017). Fundamentos de la Ingeniería de Riegos. In *Mop* (Vol. 1).
- Villalobos Araya, M. (2001). Riego por goteo. In *Riego por Goteo*.
- Villalobos Araya, M. (2008). *Fundamentos de riego* (1st ed.). Cartago, Costa Rica: Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico (CDMB).
- Villalobos Araya, M., & Valverde Conejo, J. C. (2016). *Principios de riego y drenaje en suelos tropicales*.
- Viloria Villegas, M. I., Cadavid, L., & Awad, G. (2018). Metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(2), 121–156. <https://doi.org/10.18359/rcin.2941>