

Informe Final Proyecto Extensión

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Programa de Regionalización
Informe Final de Proyecto de Extensión

Implementación de un modelo de gestión de los sistemas de riego mediante aplicación de riego de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago (Etapa III)

Ing. Kerin Romero Calvo

Ing. Milton Solórzano Quintana

Diciembre, 2024

1. Tabla de contenido

1.	Tabla de contenido	2
2.	Código, título del proyecto y periodo de ejecución.....	5
3.	Autoría	5
4.	Resumen	5
5.	Abstract.....	6
6.	Palabras clave y key words	6
7.	Contextualización del proyecto.....	6
8.	Estrategia de abordaje	8
9.	Valoración general de los resultados obtenidos.....	9
10.	Logro del propósito y los componentes.....	10
11.	Logros no contemplados en el proyecto.....	11
12.	Detalle de evidencias.....	11
13.	Integración con la academia.....	11
14.	Cumplimiento del plan de socialización y publicación.....	12
16.	Limitaciones y problemas encontrados	14
17.	Lecciones aprendidas, conclusiones y recomendaciones	14
18.	Agradecimientos	14
19.	Referencias.....	14
1	Apéndices y anexos	15
1.1	Apéndice 1. Estado del arte y marco referencial del abordaje del proyecto.....	15
1.1.	Cultivos desarrollados en la zona.....	17
1.1.1.	Papa.....	17
1.1.2.	Cebolla.....	18
1.1.3.	Fresa	19
1.1.4.	Zanahoria	20
1.1.5.	Repollo	21
1.1.6.	Aguacate	22
1.1.7.	Kc de los cultivos.....	23
1.2.	Relación Cultivo, Textura, Clima y Humedad.....	23
1.2.1.	Textura.....	23
1.2.2.	Evapotranspiración.....	25
1.2.3.	Humedad En El Suelo.....	25
1.2.4.	Déficit Permitido En El Manejo Del Riego.	26

1.2.5.	Métodos Para Medir La Humedad En El Suelo	26
1.3.	Diseños De Campo	27
1.3.1.	Dispositivos RTK.....	27
1.3.2.	Tratamiento De La Información.....	30
1.3.3.	Métodos Del Tratamiento De La Información Espacial (SIG)	31
1.4.	Diseño Del Sistema De Riego.	33
1.4.1.	Diseño Agronómico	33
1.4.2.	Diseño Hidráulico	34
1.4.3.	Diseño Asistido por Software	35
1.5.	Métodos De Riego	35
1.5.1.	Riego por goteo.....	36
1.2	Apéndice 2. Metodología de abordaje del proyecto.....	40
1.6.	Tratamiento De La Información	40
1.6.1.	Métodos Del Tratamiento De La Información Espacial.....	41
1.7.	Diseño De Siembra	44
1.8.	Diseño De Riego.....	44
1.8.1.	Diseño Agronómico	44
1.8.2.	Diseño Asistido por Software	45
1.3	Apéndice 3. Caracterización de las unidades de producción	46
1.4	Apéndice 5. Diseños de riego eficiente	66
1.5	Apéndice 6. Diseño de implementación de sistema de gestión	85
1.6	Apéndice 7. Logros no contemplados en el proyecto	87
1.7	Apéndice 8. Evidencias de giras y socialización de los resultados	88
1.8	Apéndice 9. Participación de estudiantes con trabajos de grado y posgrado	91
-	Resumen	94
-	1- Antecedentes	95
-	2- Justificación	96
-	3- Delimitación del problema	97
-	4- Introducción	98
-	5- Objetivos	99
-	6- Revisión de literatura	100
-	6.1. El cultivo de cebolla:	101
-	6.1.1. Características del cultivo de la cebolla	101
-	6.1.2. Necesidades hídricas de la cebolla.....	102
-	6.2. El cultivo de patata:	103
-	6.2.1. Características del cultivo de la patata	103

- 6.2.2. Necesidades hídricas de la patata	103
- 6.3. El cultivo de zanahoria:	104
- 6.3.1. Características del cultivo de la zanahoria	104
- 6.3.2. Necesidades hídricas de la zanahoria	104
- 6.4. El riego agrícola.....	105
- 6.4.1. Riego superficial.....	105
- 6.4.2. Riego por aspersión	105
- 6.4.3. Riego localizado	105
- 6.5. Diseño del sistema de riego:	105
- 6.6. Gestión y monitoreo del riego agrícola.....	107
- 6.6.1. Instrumentación para la toma de datos.....	107
- 6.6.2. Análisis de la información	110
- 7- Metodología del proyecto	111
- 7.1. Tratamiento de la información	112
- 7.1.1. Métodos de tratamiento de la información	113
- 7.2. Caracterización de las unidades de producción.....	115
- 7.3. Diseño de siembra.....	116
- 7.4. Diseño de riego.....	116
- 7.4.1. Diseño agronómico	116
- 7.4.2. Diseño asistido por software	117
- 7.5. Gestión y monitoreo del riego agrícola.....	118
- 7.5.1. Instrumentación para la toma de datos.....	118
- 7.5.2. Análisis de la información	119
- 8- Resultados del proyecto	122
- 8.1. Altimetría y tipos de suelo de la parcela modelo	122
- 8.2. Diseño de riego de precisión para la parcela de estudio	123
- 8.2.1. Diseño agronómico	123
- 8.2.2. Diseño hidráulico.....	124
- 9- Conclusiones	126
- 10- Recomendaciones	127
- 11- Bibliografía	127

2. Código, título del proyecto y periodo de ejecución

1421030, Implementación de un modelo de gestión de los sistemas de riego mediante aplicación de riego de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago (Etapa III). Ejecutado desde el desde el 1 de mayo del 2023 hasta el 31 de diciembre del 2024

3. Autoría

Nombre	Participación	Instancia académica o dependencia	Aportes específicos
Ing. Kerin Romero Calvo	Coordinación	Escuela de Ingeniería Agrícola	Coordinación y elaboración del modelo de gestión.
Ing. Milton Solórzano Quintana	Extensionista	Escuela de Ingeniería Agrícola	Supervisión del modelo de gestión.

4. Resumen

El proyecto “Implementación de un modelo de gestión de los sistemas de riego mediante aplicación de riego de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago (Etapa III)” tuvo como propósito optimizar el uso del recurso hídrico en 42 unidades de producción hortícola de la zona norte de Cartago, mediante la integración de técnicas de agricultura de precisión y automatización de riego. La estrategia de abordaje incluyó la recopilación e integración de información de etapas previas, la caracterización de unidades de producción y de la demanda hídrica, el diseño de sistemas de riego eficientes, la propuesta de automatización y el desarrollo de un modelo de gestión.

Entre los principales logros destacan: la elaboración de mapas de textura y relieve, bases de datos de cultivos, diseños hidráulicos optimizados, balances hídricos y dashboards de gestión para cada parcela. Además, se instalaron sensores de humedad de suelo que permiten la toma de decisiones en tiempo real, y se desarrolló una metodología práctica y replicable para los productores. El proyecto fortaleció la organización comunitaria, promovió la articulación entre productores, academia e instituciones, y generó capacidades técnicas

para un manejo más sostenible del agua, contribuyendo así a la productividad y resiliencia de los sistemas agrícolas locales.

5. Abstract

The project “Implementation of a management model for irrigation systems through precision irrigation application for the Water Users’ Association (SUA) of the Sanatorio Durán Project, Cartago (Stage III)” aimed to optimize water use in 42 horticultural production units in northern Cartago, Costa Rica, by integrating precision agriculture techniques and irrigation automation. The approach included gathering and integrating previous project information, characterizing production units and water demand, designing efficient irrigation systems, proposing automation schemes, and developing a management model.

Key achievements include the creation of soil texture and slope maps, crop databases, optimized hydraulic designs, water balance calculations, and management dashboards for each plot. Soil moisture sensors were installed to support real-time decision-making, and a practical, replicable methodology for farmers was developed. The project strengthened community organization, promoted collaboration among farmers, academia, and institutions, and built technical capacities for sustainable water management, thus enhancing the productivity and resilience of local agricultural systems.

6. Palabras clave y key words

Riego de precisión, Gestión del recurso hídrico, Agricultura de precisión, Sensores de humedad, Automatización de riego

7. Contextualización del proyecto

Antes de la ejecución del proyecto, la población beneficiaria compuesta por 42 unidades de producción hortícola (Figura 1) integradas en la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, en la zona norte de Cartago, enfrentaba diversos retos en torno a la gestión técnica y sostenible del recurso hídrico. A pesar de estar ubicada en una región privilegiada por sus suelos fértiles y con alta capacidad de drenaje, la ausencia de modelos técnicos de planificación y gestión del agua para riego limitaba el potencial productivo de cultivos como papa, zanahoria, cebolla y fresa, y reducía la capacidad de adaptación de los productores ante eventos climáticos extremos, como las sequías.

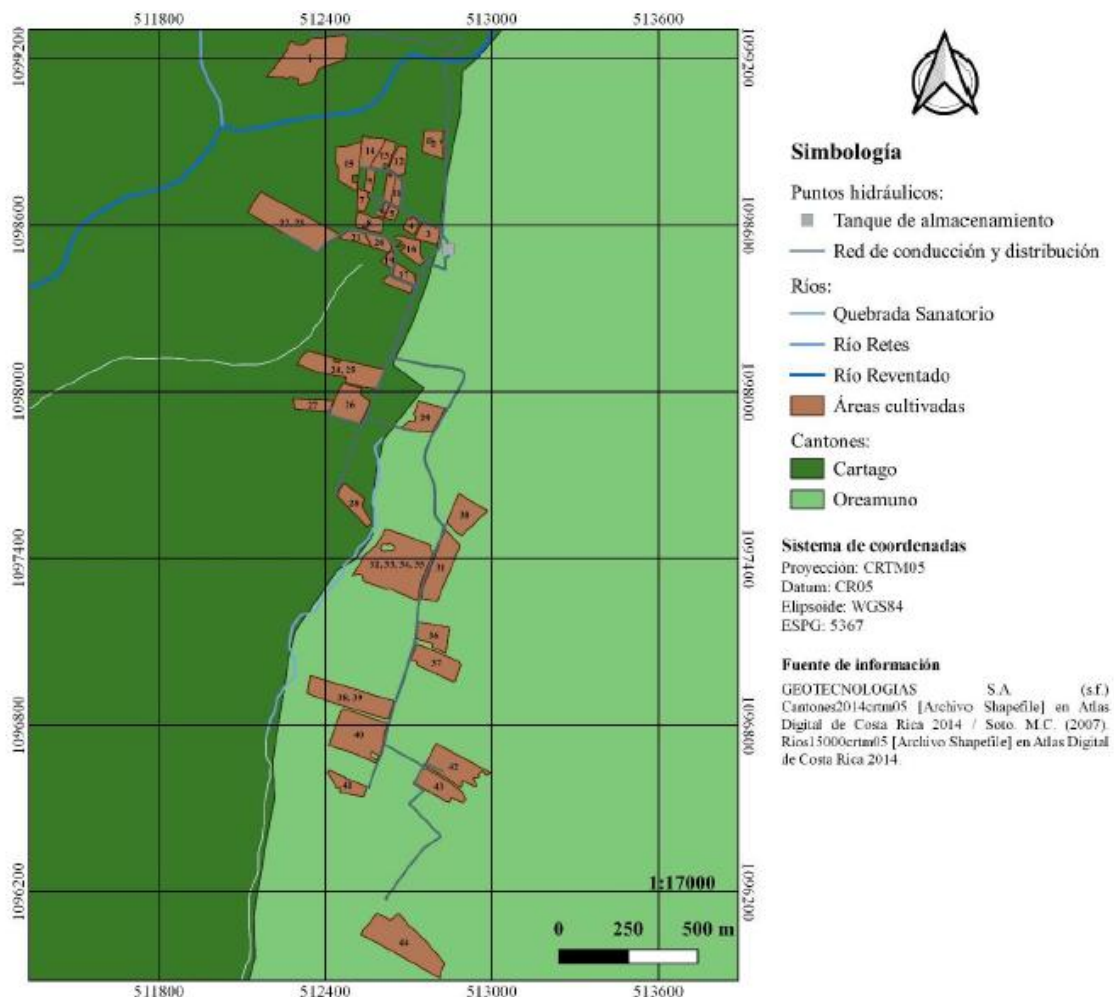


Figura 1: Ubicación geográfica de las áreas cultivadas de la SUA. Fuente: Guzmán-Arias, Solorzano-Quintana y Watson Hernández (2022).

Esta limitación operativa no solo comprometía la eficiencia del riego, sino que también afectaba la sostenibilidad de los sistemas agrícolas locales. A pesar de contar con concesiones del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA), no existían herramientas que facilitaran una toma de decisiones basada en indicadores técnicos ni en el monitoreo de condiciones edafoclimáticas, lo cual generaba sub o sobreutilización del recurso hídrico, mermando los rendimientos agrícolas y la resiliencia de las fincas.

El proyecto ha generado un impacto significativo en las dinámicas sociales y comunitarias de la SUA. A través de la ejecución progresiva de tres etapas centradas en el análisis de suelos, diseño de sistemas de riego y desarrollo de modelos de gestión se ha promovido una articulación efectiva entre productores, académicos, extensionistas y actores institucionales. La colaboración con instituciones como el MAG, SENARA, y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) ha propiciado un entorno de cooperación interinstitucional, orientado a la construcción de capacidades locales en gestión del recurso hídrico.

Además, la incorporación de estudiantes en actividades de campo y el uso de herramientas como sistemas de información geográfica, sensores de humedad y plataformas de monitoreo ha fortalecido el vínculo entre la academia y el sector productivo. Este proceso ha favorecido no solo la apropiación tecnológica por parte de los productores, sino también el desarrollo de una cultura de corresponsabilidad en el uso del agua.

El desarrollo de mapas temáticos, balances hídricos, indicadores de riego y dashboards de gestión ha servido como herramienta colectiva para la toma de decisiones, promoviendo un mayor nivel de organización, cohesión interna y empoderamiento técnico dentro de la SUA. Así, el proyecto no solo ha mejorado las condiciones técnicas del riego, sino que también ha contribuido a fortalecer el tejido social comunitario y las relaciones colaborativas entre los distintos actores involucrados.

8. Estrategia de abordaje

La estrategia de abordaje del proyecto incluyó la integración de la información y los entregables de los proyectos “Propuesta de modelo de automatización de los sistemas de riego mediante aplicación de técnicas de agricultura de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán” y “Propuesta de automatización de la red de distribución y sistemas de riego de los productores de la Zona Norte de Cartago – Estudios Básicos”, dado que ambos fueron desarrollados en la misma área de impacto y con los mismos beneficiarios. Esto permitió su incorporación en esta nueva etapa de diseño de gestión, la cual se estructuró en cinco componentes, como se muestra en el flujograma de la Figura 2, y en los y en el Apéndices 1 y 2.

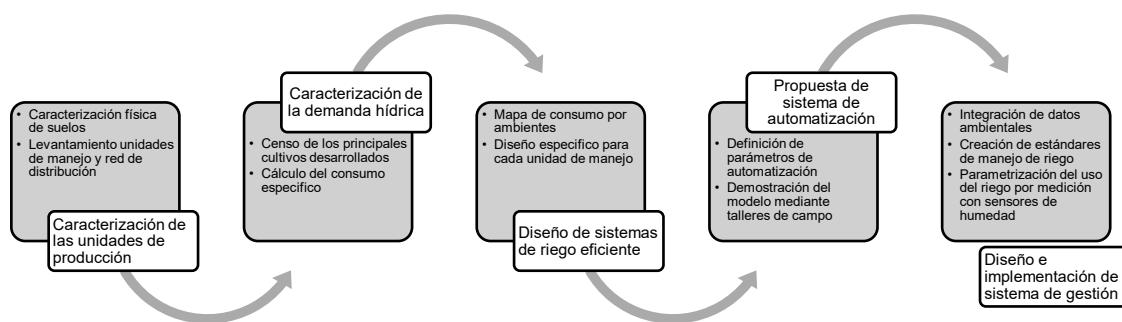


Figura 2: Flujograma de abordaje del proyecto

Caracterización de las unidades de producción: en este componente se integraron los datos espaciales de cada unidad de manejo, considerando el cultivo, tipo de suelo y la topografía del lugar.

Caracterización de la demanda hídrica: se establecieron los requerimientos de agua según las características específicas de cada parcela.

Diseño de sistemas de riego eficiente: se generaron propuestas técnicas para cada unidad de producción, seleccionando el sistema de riego más adecuado a sus necesidades.

Propuesta de sistema de automatización: se integró la información de los diseños de riego para extraer los parámetros medibles necesarios que sirvieron como base para el sistema de control.

Diseño e implementación del modelo de gestión: se utilizó toda la información generada en los componentes anteriores para construir un modelo que permitió:

- Conocer las características que afectaban el contenido de humedad en cada unidad de riego.
- Establecer un sistema de medición y gestión de dichas características.
- Definir los indicadores del sistema de gestión a través de un balance hídrico, identificando las etapas y variables que podían monitorearse mediante sensores de humedad.
- Validar el modelo en parcelas experimentales.
- Generar una metodología práctica y replicable para uso por parte de los productores.

9. Valoración general de los resultados obtenidos

1. Caracterización de las unidades de producción:

Se identificó que los suelos presentes en las unidades de producción poseen una elevada capacidad de drenaje, atribuida a la predominancia de texturas de tipo franco arcillo arenoso a franco arenoso. El análisis topográfico reveló pendientes que varían entre un 10% y un 50%, lo cual determina condiciones poco favorables para métodos tradicionales de riego superficial o por aspersión. Dado lo anterior, y considerando tanto la alta permeabilidad del suelo como la topografía escarpada, se recomienda el uso de sistemas de riego localizado, que minimicen las pérdidas por escurrimiento y la susceptibilidad a la erosión. Los resultados completos de esta caracterización se presentan en el Apéndice 3.

2. Caracterización de la demanda hídrica:

La demanda hídrica se estableció a partir de un levantamiento de información directa con los productores, identificando que los principales cultivos en la zona son cebolla, papa y zanahoria. Los resultados se detallan en el Apéndice 4.

3. Diseño de sistemas de riego eficiente:

Con base en la recomendación de riego localizado, se definió una reducción del 20% en el área efectiva de riego, permitiendo optimizar el uso del recurso hídrico. Se estableció una frecuencia de riego de cada dos días, lo que permite planificar el suministro de agua a través de una red que opera con un caudal máximo de 9,92 l/s, atendiendo una superficie de 0,64 ha/h con ciclos de riego de 1 hora. Los planos y especificaciones hidráulicas para cada parcela están disponibles en el Apéndice 5.

4. Propuesta sistema de automatización:

El sistema de automatización propone el monitoreo con sensores de humedad en los rangos de humedad bajo los que puede retener agua el suelo. Los mismos se encuentran en rangos típicos detectables por la mayoría de los sensores de humedad disponibles en el mercado. El detalle de la interpretación de los valores del sensor de humedad se encuentra en el Apéndice 9. Metodología del proyecto, Ilustración 9.

5. Diseño e implementación del modelo de gestión:

El diseño del sistema de automatización se basó en la instalación de sensores de humedad de suelo, los cuales permiten realizar un seguimiento continuo del contenido hídrico en las zonas radicales. Estos sensores operan dentro de los rangos de humedad propios del suelo local, permitiendo detectar el momento óptimo para la aplicación de riego según el porcentaje de agotamiento permisible. El sistema no solo permite monitorear condiciones en tiempo real, sino que también apoya la toma de decisiones para una gestión más precisa y eficiente del agua en cada unidad de producción. La interpretación y uso de los datos de los sensores se presenta en el Apéndice 6 - Apéndice 9: *Metodología del proyecto, Ilustración 5, 6, 7 y 8.*

10. Logro del propósito y los componentes

Propósito (objetivo general):	Generar un modelo de gestión de los sistemas de riego para la mejora en el uso y aprovechamiento del agua mediante aplicación de riego de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago.			
Componentes (objetivos específicos)	Indicador	% de logro	Comentarios	
Caracterización de las unidades de producción	42 mapas de textura y relieve	100	Apéndice 3	
Caracterización de la demanda hídrica	Base de datos de cultivos	100	Apéndice 4	
Diseño de sistemas de riego eficiente	42 diseños de sistemas de riego eficiente	100	Apéndice 5	

Propuesta sistema de automatización	1 diagrama general de automatización	100	Apéndice 9: <i>Metodología del proyecto, Ilustración 9</i>
Diseño e implementación de gestión	42 balances hídricos con su respectivo dashboard	100	Apéndice 6 - Apéndice 9: <i>Metodología del proyecto, Ilustración 5,6,7 y 8.</i>

11. Logros no contemplados en el proyecto

Diseño y construcción de una estación para la medición de la humedad en el suelo y evapotranspiración. Apéndice 7.

12. Detalle de evidencias

Fecha de actividad/Gira/ reunión	Número de anexo / enlace / carpeta / respaldo digital
12/03/2024	Apéndice 8, Figuras 81, 82, 83
18/11/2024	Apéndice 8, Figura 84

13. Integración con la academia

Participación de estudiantes asistentes

Nombre del estudiante	Carrera	Actividades realizadas
Jazel Guzman	Ingeniería Agrícola	Participación en giras, análisis de muestras de suelo en laboratorio.
Josué Marin	Ingeniería Electrónica	Elaboración sensor de humedad de suelo
Ericka Picado	Ingeniería Agrícola	Elaboración sensor de humedad de suelo
Yorjani Zumbado	Ingeniería Agrícola	Participación en giras, análisis de muestras de suelo en laboratorio.

Participación de estudiantes con trabajos de grado y posgrado

Nombre de obra	Tipo de obra (TFG, prácticas de especialidad, tesis)	Autores	Enlace al documento
PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN DEL RIEGO PARA OPTIMIZAR EL USO DE AGUA MEDIANTE SENSORAMIENTO EN LA SOCIEDAD DE USUARIOS DEL SANATORIO DURAN EN LA ZONA AL NORTE DE CARTAGO, COSTA RICA.	Tesis Final de Maestría	Laura Alonso Martinez	Apéndice 9

Participación de estudiantes de cursos de grado o posgrado

Curso	Carrera	Objetivo del curso	Actividades realizadas (giras académicas, proyectos de cursos, actividades de clase)	Evidencias (enlace al documento)
No aplica				

14. Cumplimiento del plan de socialización y publicación

a. Estrategia de socialización de los resultados

La socialización de los resultados del proyecto se realizó en escenarios y lenguaje accesible para la población meta, principalmente a través de la entrega de los productos técnicos generados diseños de riego, balances hídricos y dashboards y su explicación directa a los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA). Los resultados se compartieron de forma presencial durante las actividades de campo y reuniones con los beneficiarios, así como mediante la entrega de la memoria del proyecto y sus apéndices, que sistematizan la experiencia y facilitan su consulta posterior.

b. Estrategia de comunicación y visibilidad de los productos académicos

Nombre de producto académico	Tipo de producto académico	Estado (aceptado por publicar y publicado)	Base de datos de indexación (cuando corresponda)	Nombre de evento, revista o editorial	Comité científico y/o Consejo editorial (Si ó NO)
No aplica					

15. Ejecución Presupuestaria

Objeto de gasto	Monto asignado	Monto ejecutado	Porcentaje ejecución	Justificación o limitación de lo no ejecutado
Becas estudiante asistente especial	₡3,800,500.00	₡3,800,500.00	100.0%	NA
Combustibles y lubricantes	₡260,000.00	₡242,004.00	93.1%	Diferencias entre lo cotizado y el monto final de compra
Materiales y Productos Eléctricos - Telefónicos y de Cómputo	₡554,500.00	₡479,045.00	86.4%	Diferencias entre lo cotizado y el monto final de compra
Repuestos y accesorios	₡275,000.00	₡274,529.20	99.8%	Diferencias entre lo cotizado y el monto final de compra
Servicio unidad de transportes	₡500,000.00	₡500,000.00	100.0%	NA
Viáticos dentro del país	₡10,000.00	₡10,000.00	100.0%	NA

16. Limitaciones y problemas encontrados

Como principal limitante se tiene los tiempos en los que se atiende la convocatoria. En un primer lugar por la cantidad de meses estimados para el proyecto, ya que este proyecto comenzó prácticamente finalizando el primero semestre de 2023, lo cual no permitió una adecuada planificación de la carga laboral. Segundo por el semestre en el que se atiende, lo cual no coincide con la realidad de aplicación de técnicas con los productores, ya que ellos desarrollan el riego en verano, lo cual únicamente permitió desarrollar el modelo en un único semestre (verano 2024). Tercero la apertura de los presupuestos operativos tardó demasiado, lo cual sumado a que el proyecto inició avanzado el año 2023, afectó negativamente al cumplimiento de la ejecución presupuestaria.

17. Lecciones aprendidas, conclusiones y recomendaciones

Como recomendaciones generales se tienen los siguientes puntos:

1. En materia de tiempos y presupuestos se recomienda tomar la opinión de los extensionistas para poder contextualizar las propuestas y futuros proyectos con la realidad de ejecución de los productores.
2. En materia de ejecución presupuestaría valorar la posibilidad de crear mecanismos de compras más expeditos no solo para cumplir con el gasto, si no para poder obtener los insumos en tiempo y forma, además de tener flexibilidad con compras extraordinarias, ya que al trabajar con modelos productivos agrícolas hay algunos temas que se resuelven en el día a día.
3. En materia de difusión de los productos y entregables a los beneficiarios se debe de trabajar en conjunto con entes vinculantes o que puedan generar un acercamiento y mejor compromiso.

18. Agradecimientos

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, a la Corporación Hortícola Nacional y a la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago por sus aportes invaluable para la realización del proyecto en cada uno de sus aportes.

19. Referencias

Guzmán-Arias, I., Solorzano-Quintana, M., y Watson Hernández, F., (2022). Propuesta de automatización de la red de distribución y sistemas de riego de los productores de la Zona Norte de Cartago-Estudios Básicos (Etapa I).

1 Apéndices y anexos

1.1 Apéndice 1. Estado del arte y marco referencial del abordaje del proyecto

Estado del arte

La producción agrícola en Costa Rica es una de las áreas que más aportan a la economía del país, propiciando un movimiento económico tanto dentro como fuera las fronteras. Y es que, según Arauz (2020) el sector agro del país produce cerca del 70% de la canasta básica alimentaria y produce el 40% de las exportaciones de bienes, logrando generar gran cantidad de empleo y divisas por la actividad agroexportadora, esto, además, a partir del aporte de más de 280 000 personas que se dedican a la producción agropecuaria, en las distintas regiones del país.

Sin embargo, a pesar del aporte que se brinda para el país los pequeños productores se ven afectados ante el valor adquirido por los productos, dado que, según O'Neal (2020); “Los pequeños productores obtienen entre un 10% y 30% del margen de utilidad, la agroindustria un 30% y 45% y los intermediarios ganan, inclusive, hasta un 50% sobre el valor del producto”. Esto representa la clara desigualdad de precios que se presenta entre los diferentes intermediarios de producción y comercialización, y los pequeños agricultores, que dependen de diferentes factores para poder contribuir con el desarrollo económico del país.

Y es que, el sector agropecuario se ha visto afectado por gran cantidad de eventos, que han interferido en el desarrollo de los cultivos y comercialización de los mismo, donde la problemática de la falta de recurso hídrico es un factor determinante, diferentes productores han mencionado que el clima determina el 40% de las cosechas que puedan obtener, principalmente por las épocas de sequía (Presidencia de la República de Costa Rica., 2021).

Ante este problema, el Gobierno de Costa Rica ha generado estrategias para lograr favorecer al sector agrícola, principalmente de la Zona Norte de Cartago, región en la cual se da una falta de recurso hídrico debido al exceso de consumo que ha existido en las diferentes fincas agrícolas y que hoy en día provoca una afectación en el desarrollo correcto de los cultivos. Parte de estas estrategias ha sido la construcción de cerca de 120 reservorios para los productores de regiones como Llano Grande y Tierra Blanca, con la inversión total de más de 600 millones de colones, con el apoyo del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Instituto de Desarrollo Rural (INDER) y el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (Senara) (Presidencia de la República de Costa Rica, 2020).

Esta inversión permite mitigar la problemática de la falta de agua, ante la visión de generar un “Aprovechamiento Hídrico Sostenible” orientado a la generación de una infraestructura de riego eficientes y el desarrollo de técnicas sustentables. Este proyecto, entrado también a contribuir por ejemplo con el Programa AGRINNOVACIÓN 4.0 impulsado por el MAG y otras instituciones que buscan generar a las familias productoras una seguridad hídrica y sobre todo una mayor estabilidad en la producción agrícola, donde no existan productos por sequía y los precios se mantengan estables sin generar pérdidas considerables (Presidencia de la República de Costa Rica., 2021).

En Costa Rica, la política con respecto a el riego ha cambiado significativamente en los últimos años, tal y como expone Herrera (2002), el objetivo inicial del Plan Nacional de Riego y Avenimiento en pequeñas áreas era dotar de agua para riego a organizaciones de pequeños y medianos productores, permitiéndoles romper la estacionalidad de las cosechas. Sin embargo, debido a la crisis mundial del cambio climático, aumenta la variabilidad del ciclo del agua, lo que dificulta la previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, disminuye la calidad del agua, exacerba aún más su escasez y constituye una amenaza al desarrollo sostenible en todo el mundo (ONU, 2019). Esto influye directamente sobre los rendimientos de los cultivos bajo riego. En Cartago, específicamente en la Zona norte, esta problemática no es una excepción, donde según lo expuesto por Varela (2011), el crecimiento demográfico, la industrialización, la contaminación creciente por agroquímicos y la inexistencia de una cultura de ahorro de agua en los usuarios, amenaza el futuro suministro de agua, en calidad y cantidad apropiadas.

Es por esta razón que nace la necesidad de desarrollar nuevas maneras para suplir los requerimientos hídricos de los cultivos de manera más eficiente, teniendo en mente la variabilidad climática presentada en la zona.

Carvajal (2014), examinó como y porque diferentes Sociedades de Usuarios de Agua para riego en la parte alta de la cuenca del Río Reventado, Cartago Costa Rica, establecen estrategias para adaptarse a la degradación de sus recursos hídricos, él expuso que el manejo de estos recursos se complica ante cambios en las condiciones demográficas, económicas, sociales y biofísicas a las cuales sus residentes están expuestos, y en muchos casos, sin un adecuado acompañamiento del estado. Carvajal (2014) encontró que debido a los cambios en los patrones de las lluvias se dio un aumento en el requerimiento de las concesiones de agua y un aumento de ilegales y esto impacta directamente en el rendimiento, calidad de los productos y costos de producción, sequedad del suelo además de impactos en la disponibilidad y distribución del agua. Y por esta razón, recomendó a los horticultores seguir organizados de la manera que actualmente están y seguir en la gestión de mejoras para sus sistemas de riego, preferiblemente cambiar el sistema por aspersión al sistema por goteo.

Debido a estas problemáticas mencionadas el MAG argumentó que los agricultores de la Zona Norte de Cartago tienen un bajo índice de producción. Eso está vinculado principalmente a factores climáticos, como lo es el agua (como se citó en N. Chinchilla, 2018). Por esta razón se dio una vinculación entre el TEC y el MAG para remediar esta situación y amortiguar estos efectos del cambio climático buscando un manejo adecuado y eficiente del recurso hídrico para la zona en el cultivo de cebolla por medio de sensores de humedad para una parcela de menos de 2000m². Según Chavarría, con los ajustes a la agricultura tradicional, mediante la utilización de los sensores y las buenas prácticas en la agricultura, el siembra de cebolla es más eficiente en el uso del recurso agua (protección del recurso hídrico), en la nutrición y en la disminución de plagas y enfermedades. Esto se ha manifestado en la robustez de la plantación, lo cual es un pronóstico de alta producción según los agricultores de la zona (como se citó en N. Chinchilla, 2018).

Tomando todo lo anterior en consideración es donde nace la motivación de este proyecto, de la necesidad para la creación e implementación de una herramienta de gestión del agua se presenta como una necesidad en la zona Norte de Cartago, motivada por la intención de llenar los vacíos de estas referencias mencionadas anteriormente. Donde la novedad de esta herramienta se centra en la

integración de información de cada unidad de manejo para establecer sistemas de riego específicos según las necesidades de los productores, así como en la implementación de técnicas de riego de precisión para maximizar el uso del agua en los cultivos. La importancia de esta herramienta de gestión del agua radica en su capacidad para permitir a los productores hortícolas mejorar la gestión del recurso hídrico, lo que se traduce en un aumento de la eficiencia en el uso del agua y una mejora en el rendimiento de los cultivos. Destacado en el uso adecuado del agua es fundamental para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, ya que contribuye a minimizar el impacto ambiental y a preservar el recurso para las generaciones futuras. Resumiendo todo lo anterior en una herramienta de gestión del recurso hídrico optimizado según las necesidades con el objetivo de aumentar la productividad de los cultivos de la zona, promoviendo la sostenibilidad ambiental.

Marco referencial

1.1. Cultivos desarrollados en la zona

La zona norte de Cartago es una región donde se da una de las mayores producciones de hortalizas y otros cultivos como frutales a nivel nacional, dentro de estos cultivos producidos en la zona se puede mencionar la papa, cebolla, zanahoria, fresa, repollo e inclusive aguacate.

1.1.1. Papa

1.1.1.1. Descripción Y Generalidades Del Cultivo.

Solanum tuberosum, comúnmente llamada papa o patata, es una planta herbácea, tuberosa, perenne a través de sus tubérculos, caducifolia (ya que pierde sus hojas y tallos aéreos en la estación fría), de tallo erecto o semi-decumbente, que puede medir hasta 1 m de altura (Leveratto, 2015). Con una profundidad de raíces de entre los 40 y 60 cm.

Este cultivo es originario de la región andina de Sudamérica. Las primeras siembras se realizaron cerca de las orillas del lago Titicaca, entre las fronteras de Perú y Bolivia (Henkes & Dunn, 1981). Este cultivo es de suma importancia para la alimentación alrededor del mundo, La papa o patata es especialmente apropiada para climas fríos. Se cultiva ampliamente en regiones tropicales frías, subtropicales y templadas, donde se siembra como monocultivo, en rotación, o en multicultivo (Steduto et al., 2012).

La FAO en el 2008, colocó a América latina como el 4 mayor productor de papa a nivel mundial por debajo de África y por encima de América del norte, con un promedio de 963 766 hectáreas y un rendimiento de 16.3 t/ha. En Costa Rica, la producción de papa se da mayoritariamente en la zona norte de Cartago, donde según el MAG, 2016, se produjeron alrededor de 2800 hectáreas, con un rendimiento promedio de 25t/ha.

En Costa Rica existe una gran diversidad de variedades de papa, estas variedades en su gran mayoría se encuentran inscritas en la Oficina Nacional de Semillas (ONS), la variedad que cuenta con mayor demanda en el país es la denominada Floresta, la cual cumple los usos de consumo fresco y utilización en la industria. Adicionalmente las variedades que se siembran comúnmente en la Zona Norte de son las variedades Durán y Única.

La duración de crecimiento este cultivo es de alrededor de 100 a los 130 días, variando según el cultivar utilizado. Para la Zona Norte de Cartago se recomienda realizar la siembra en los meses de mayo-junio y en octubre-noviembre, realizándose la cosecha en los meses de agosto-setiembre y enero-febrero, respectivamente.

1.1.1.2. Necesidades Hídricas.

La papa o patata requiere de 0.35 a 0.8 m³ de agua para producir 1 kg de materia seca de tubérculos. En condiciones de campo, esto se traduce en requerimientos hídricos de 350 a 650 mm durante el período de crecimiento, que dependen del clima y de la variedad. En condiciones de suministro hídrico limitado, el suministro disponible, preferencialmente, debería centrarse en maximizar el rendimiento por hectárea en lugar de repartir el agua limitada en un área más grande. Se puede ahorrar agua principalmente a través de un calendario mejorado y profundidad de la aplicación del riego (Steduto et al., 2012).

La papa o patata es sensible al déficit hídrico. La escasez de agua puede provocar un rendimiento reducido de los tubérculos, en cantidad y en tamaño, y una disminución de la calidad de estos. Con el fin de optimizar el rendimiento, generalmente no se debe agotar el agua disponible total del suelo más allá del 30 al 50 %. El déficit hídrico en las primeras etapas, durante la formación de estolones, la brotación de tubérculos y después de la misma, tiene los efectos más adversos en el rendimiento final (Steduto et al., 2012).

1.1.2. Cebolla

1.1.2.1. Descripción Y Generalidades Del Cultivo.

Allium Cepa L. Liliaceae comúnmente llamada cebolla, es un cultivo de la misma familia del ajo y otras especies pertenecientes al género Allium como los son el cebollín y puerro. Schroder et al., 2010 indican que la cebolla es un cultivo herbáceo bianual (requiere 2 años por generación), el bulbo es un tallo modificado con raíces fibrosas y carnosas conocidas como catáfilas, este cultivo cuenta con una profundidad de raíces donde el 90% de estas se encuentran entre los primeros 20 a 30cm.

La cebolla es originaria de las regiones secas de Asia y tanto la anatomía como la fisiología de la planta indican con claridad que este cultivo se desarrolla bien en condiciones de baja humedad relativa, alta insolación y bajo suministro de agua. Su primera fase es la vegetativa, que inicia con la germinación de la semilla y finaliza con la formación del bulbo, que es el órgano de la planta conformado por túnicas, escamas, un tallo verdadero y yemas, las cuales pueden entrar en dormancia o receso. La segunda fase es la reproductiva donde la planta produce tallos florales y semillas (Montes & Holle, 1990).

En Costa Rica existen tres principales focos de producción los cuales se dividen según la altitud de cada zona, estas tres zonas son la alta, media y baja. La primera, el enfoque de este estudio, se refiere a la zona norte de la provincia de Cartago y comprende los cantones de Tierra Blanca, Llano Grande, Cot y Potrero Cerrado, Según Granados & Saborio, 2011, esta zona mencionada engloba el 75% del total de la producción a nivel nacional. El rendimiento de este cultivo para la zona mencionada ronda los 27 a 50 t/ha. En la zona norte de Cartago se encuentran 4 cultivares principales, Gladlan Brown, E-515, Matahari y Linda Vista, ordenadas de menor a mayor

conforme con el rendimiento según el cuadro elaborado por Schroder et al., 2010. En la zona alta de Cartago, se ha obtenido muy buenos rendimientos experimentales (de 46 a 64t/ha) con los híbridos Granex 33, Granex 2000 y Yellow Granex 429, según (MAG, 1991b).

Con respecto a la siembra y a la cosecha, según el MAG, 2004 en la Zona Alta (Cartago) la fecha más importante de producción (según área cultivada) es la que inicia la última semana de abril –primera semana de junio y cosecha hacia finales de agosto, todo setiembre y principios de octubre. Esta época corresponde a la siembra de invierno y el cultivo se desarrolla en su totalidad bajo la lluvia. Sin duda esta es la opción por la cual optan la mayoría de los productores, puesto que no requieren instalar sistema de riego. Posteriormente sigue en importancia la siembra de finales de agosto y setiembre que culmina a finales de diciembre y durante enero; esta requiere el uso de riego en las etapas finales o el uso de variedades que toleren alto déficit hídrico. Finalmente se encuentra la época que inicia entre el 15 de enero y el 15 de marzo; el cultivo requiere riego aproximadamente en el primer 50% de su ciclo y se cosecha entre mayo y junio.

1.1.2.2. Necesidades Hídricas.

Según Salazar & Benavides (2007) la precipitación media idónea para este cultivo ronda los 1400mm. Para la época seca, se ha encontrado que una lámina total aplicada en conjunto con las precipitaciones de la zona es de 610mm aplicada por gravedad, brinda rendimientos de alrededor de 40t/ha, con respecto al riego por goteo, se encontró que láminas totales de 462mm brinda rendimientos de alrededor de 50t/ha (Lipinski et al., 2002). El riego se debe realizar cuando se ha agotado alrededor del 25 al 35% del agua disponible, es común realizar el riego con una frecuencia de entre 3 a 5 días, según el contenido de humedad presente en el suelo y las lluvias. Es recomendable no llevar el cultivo al estrés hídrico ya que esto afecta la tasa de crecimiento y por ende el rendimiento de la producción.

De acuerdo con PROAIN(2020), para la zona central de México, país donde realizan riego en el 97,4% de la superficie sembrada, la lámina neta fluctúa entre los 2500-5500 m³/ha, dependiendo de la zona, variedad y pluviometría del cultivo.

1.1.3. Fresa

1.1.3.1. Descripción Y Generalidades Del Cultivo.

La *Fragaria* spp. Rosaceae, llamada comúnmente fresa o frutilla (en otros países) es una planta pequeña de no más de 50cm de altura, que pertenece a la familia Rosaceae y al género *Fragaria*. Lo que se conoce como fruto, es un receptáculo floral engrosado (Aguenio), sobre el cual se observan semillas como pequeñas manchas amarillas (S. Chinchilla, 2013). La planta de fresa es perenne ya que, por su sistema de crecimiento, constantemente está formando nuevos tallos, que la hacen permanecer viva de forma indefinida. Esta planta es pequeña con numerosas hojas trilobuladas de pecíolos largos, que se originan en una corona o rizoma muy corto, que se encuentra a nivel del suelo y constituye la base de crecimiento de la planta; en ella se encuentran tres tipos de yemas; unas originan más tallos, que crecen junto al primero, otras los estolones, que en contacto con el suelo emiten raíces y forman nuevas plantas, y el tercer tipo de yemas, forman los racimos florales cuyas flores son hermafroditas y se agrupan en racimos. Las raíces de la fresa

son fibrosas y poco profunda, de aproximadamente 20 a 30cm Previo al “descubrimiento” de América, en Europa se cultivaban las especies *Fragaria vesca* y alpina, con el descubrimiento de América se encontraron las especies *Fragaria chiloensis* y virginiana (MAG, 1991b).

Según los datos brindados por la ONU (2020), el país que cuenta con mayor producción a nivel mundial es Estados Unidos (cifra oficial) con 3.326.816 toneladas. Costa Rica, cuenta con una producción de 4.959 toneladas para ese mismo año. Según ### el rendimiento a nivel país ronda las 25-30 t/ha. Sin embargo, las variedades cultivadas en Costa Rica tienen el potencial de producción de entre 50-100 ton/ha/año (MAG, 1991b). Las principales zonas productoras de fresa en Costa Rica son: Fraijanes de Poás en Alajuela, San José de la Montaña y Vara Blanca de Heredia, San Isidro de Coronado y Llano Grande de Cartago. Solo en la provincia de Alajuela se estima que existen entre 70 y 80 hectáreas. El país produce este cultivo desde hace más de 30 años, siendo las variedades más comunes de encontrar Chandler y Oso Grande, en el presente muchos productores están comenzando el cambio a variedades más nuevas como Festival, San Andreas, Elyana y Albión (Guevara, 2019).

La fresa se puede sembrar en cualquier mes del año. Sin embargo, las pruebas realizadas indican que lo más conveniente, para todas las zonas de producción, es sembrar en los primeros meses de la época lluviosa: mayo, junio y julio. De esta forma, la planta alcanza un buen desarrollo y empieza a producir en los primeros meses de la época seca: noviembre y diciembre, con lo que se logran dos objetivos importantes: tener una planta bien desarrollada para el inicio de la producción y obtener la mayoría de la cosecha en época seca y con la mejor calidad, cuando el mercado internacional presenta los mejores precios para fruta fresca. Si se siembra durante la estación seca, la producción se obtiene en la época lluviosa, con mayores problemas fitosanitarios en la planta y en la fruta, y además disminuye la producción y la fruta se ensucia (MAG, 2007).

1.1.3.2. Necesidades Hídricas.

Con la finalidad de maximizar crecimientos y a su vez el rendimiento de la producción, no se debe permitir que la planta se encuentre en estrés hídrico, por lo que es necesario mantener el cultivo suficientemente irrigado. El cultivo de la fresa necesita de alrededor de 250 a 350mm de lámina aplicada por semana, según el tipo de suelo y las condiciones climatológicas, esta lámina se debe suplementar de acuerdo con la precipitación. Si se cuenta con un suelo arenoso se debe tener más atención y aplicar el riego de manera más frecuente y liviana (Natsheh et al., 2015). Este cultivo es muy del agua, por lo que es necesario que no se tenga que reponer cuando se tiene alrededor de 20 a 30% de agotamiento.

1.1.4. Zanahoria

1.1.4.1. Descripción Y Generalidades Del Cultivo.

Daucus carota L. popularmente llamada zanahoria, es una planta herbácea la cual, dependiendo del tiempo que tome su desarrollo, se clasifica en anual o bianual. Las primeras presentan su fase vegetativa y reproductiva en el mismo año de plantación, mientras que las bianuales presentan su fase vegetativa en un año y durante el siguiente se presenta la fase reproductiva (García, 2008). Este cultivo cuenta con profundidad de raíces de entre 50 a 100cm. La zanahoria se deriva de las formas silvestres originarias del centro de Asia, África y el Mediterráneo. Algunos autores señalan a Afganistán como el origen exacto (Núcleo Ambiental, 2015). En cuanto

a la producción mundial de zanahoria, Uzbekistán es el país que produce en mayor cantidad este cultivo, teniendo en cuenta cifras oficiales, con alrededor de 2.876.031 de toneladas, para Costa Rica la producción de zanahoria ronda las 25.781 toneladas para el año 2020, según la estadística obtenida de FAOSTAT. El 80% de la producción del país se da en la zona norte de Cartago, en los cantones de Tierra Blanca, Cot, Pacayas y Llano Grande. Según, Richmond y Méndez (2009) las variedades más utilizadas en Costa Rica son las denominadas Bolero F1 y Bangor F1, las cuales brindan rendimientos de entre 46 a 65 t/ha y 30 a 50t/ha respectivamente. El ciclo es de alrededor de 4 a 5 meses, la cosecha depende de la época de siembra y de la zona, en las zonas de Tierra Blanca, Cot, Pacayas, Llano Grande, San Luis de Santo Domingo de Heredia y varias localidades alrededor Zarcero presentan las condiciones de temperatura, tipo de suelo y disponibilidad para producir zanahorias de buena calidad, prácticamente durante todo el año (Bolaños, 1998).

1.1.4.2. Necesidades Hídricas.

De acuerdo con Nucleo Ambiental (2015) el requerimiento hídrico para la zanahoria es de 400 a 800mm al año. La aplicación de esta puede darse dependiendo del tipo de suelo y el clima, para suelos con buena proporción de limos, arcillas y arenas y un clima fresco se puede dar una vez por semana, mientras que para suelos arenosos y clima caliente puede darse inclusive hasta 2 veces por semana. El riego se debe realizar cuando este se ha agotado un 35% del Agua Disponible.

1.1.5. Repollo

1.1.5.1. Descripción Y Generalidades Del Cultivo.

El repollo o por su nombre científico *Brassica oleracea* L. es una planta dicotiledónea, herbácea y bienal, la cual se cultiva como planta anual. Perteneciente a la familia botánica Brassicaceae (Fornaris, 2014). El repollo es un cultivo de flores hermafroditas, de tallo corto, herbáceo y sin ramificaciones, sus raíces alcanzan profundidades de entre 50 y 80 cm. La mayoría de los miembros de la familia del repollo, tienen su origen en la zona del Mediterráneo, Asia menor, Inglaterra y Dinamarca. Esta familia hortícola es de las más numerosas ya que aporta alrededor de catorce hortalizas, entre las que se encuentran el brócoli y la coliflor (MAG, 1991c). Según los datos obtenidos de FAOSTATS para el 2020, el país que produjo más de este cultivo fue la India con alrededor de 92.070.000 de toneladas. Costa Rica para este mismo año logró producir 25.781 toneladas de repollo. Los sitios donde se dio esta producción son los de Zarcero, Cervantes, Capelladas, Oreamuno, Santa Rosa, Pacayas y Dulce Nombre. De igual manera esta fuente mostró que para el año 2020, a nivel país se obtuvo un rendimiento de alrededor 33t/ha. Según (MAG, 1991c) El híbrido Stone head es actualmente la variedad más difundida. Este material ha desplazado en gran medida a la variedad tradicional Golden Acre. Ambos son de ciclo corto (60-70 días a cosecha después del trasplante), cabeza redonda y compacta y peso entre 1 y 1,5 kg aproximadamente. Stone head es más resistente al reventamiento y de mayor compactación. El ciclo vegetativo de este cultivo es de entre 70 a 100 días, su normal desarrollo se da en temperaturas de entre 15 y 20°C.

1.1.5.2. Necesidades Hídricas.

Según la literatura consultada, en promedio, la aplicación de riego de entre 2.57 a 5.81mm dos veces a la semana es beneficioso para el cultivo de repollo. Con respecto al ciclo de cultivo, se encontró que se requiere entre 553 y 713 mm de riego, suplementado de acuerdo con las precipitaciones (Beshir, 2017). Cabe destacar que lo anterior mencionado depende del tipo de suelo

y del clima en donde se cultive el producto mencionado. También, es necesario realizar el riego una vez se haya llegado al 45% de agotamiento del contenido de humedad presente en el suelo.

1.1.6. Aguacate

1.1.6.1. Descripción Y Generalidades Del Cultivo.

Persea Americana Mill Lauraceae, comúnmente conocido como aguacate, es un frutal originario de México y América Central, este árbol con fruto comestible pertenece a la familia Lauraceae, de hoja perenne, cuya altura puede alcanzar hasta los 30m de altura y sus raíces pueden alcanzar hasta 1m de profundidad. Existen además híbridos antillo guatemaltecos y guatemalteco mexicanos que han dado origen a variedades y cultivares adaptados a diferentes alturas y microclimas que han hecho posible la producción de fruta durante todo el año, en Costa Rica la producción de aguacate se destina al consumo interno. Sin embargo, como el área sembrada actualmente no satisface la demanda nacional, se debe importar de otros países de Centro América y México (MAG, 1991a). A nivel mundial, en 2009 había más de 430 000 ha de plantaciones comerciales, con un rendimiento promedio mundial de 8.8 ton/ha, siendo México (con 100 000 ha), Chile y los Estados Unidos los principales países productores. Sudáfrica, España e Israel son otros países con exportaciones significativas (Steduto et al., 2012).

Se recomienda que este cultivo se siembre en zonas donde la precipitación alcance los 1.200mm anuales, bien distribuidos y en altitudes entre 800 y 2.500msnm. Se recomienda hacer siembras en la época lluviosa bien establecida, es decir junio a julio. Usualmente las cosechas. Normalmente, la primera cosecha comercial ocurre a los cinco años en árboles injertados y la cantidad de frutos producidos depende de la variedad y la atención que haya recibido la planta en su desarrollo. A los cinco años, generalmente se cosechan cincuenta frutos; a los seis años, ciento cincuenta frutos; a los siete años, trescientos frutos y ochocientos a los ocho años. Algunas variedades como Haas Fuerte y otras de fruto pequeño, pueden producir entre 1.000 y 1.500 frutos a los diez años. Las variedades de bajura empiezan a producir entre abril y agosto, las de alturas medias entre junio y setiembre y las de altura entre setiembre a abril (MAG, 1991a).

1.1.6.2. Necesidades Hídricas.

La sensibilidad extrema a los déficits y excesos hídricos indica que el calendario de riego en el aguacate debe concentrarse en mantener una aireación adecuada y al mismo tiempo evitar los déficits hídricos de los árboles (Lahav & Kalmar, 1983). En esta situación, la frecuencia de riego es un aspecto importante; aplicaciones diarias por goteo o micro-aspersores son las adecuadas en suelos de grano grueso y bien drenados. Sin embargo, el riego cada 2-3 días es más deseable en suelos de textura más pesada, que puedan sufrir condiciones anaeróbicas. Los experimentos en Chile han demostrado que al permitir entre un 50 a 60 % de agotamiento de humedad del suelo entre aplicaciones de riego (cada 5-6 días) el rendimiento y tamaño del fruto no se vieron afectados, en comparación con aplicaciones más frecuentes (Ferreira et al., 2006). Las frecuencias de riego que agotan entre 25-30 % del depósito hídrico del árbol son adecuadas para la mayoría de los

suelos, como un compromiso para mantener un suministro adecuado de agua y oxígeno para el sistema radicular del aguacate (Steduto et al., 2012).

1.1.7. K_c de los cultivos

El K_c o coeficiente de los cultivos, se refiere a la relación que existe entre la evapotranspiración con respecto a cada etapa cada etapa de crecimiento del cultivo. Este es un valor adimensional el cual ronda el 0.1 al 1,2. Esta relación se puede apreciar mejor en la figura 3.

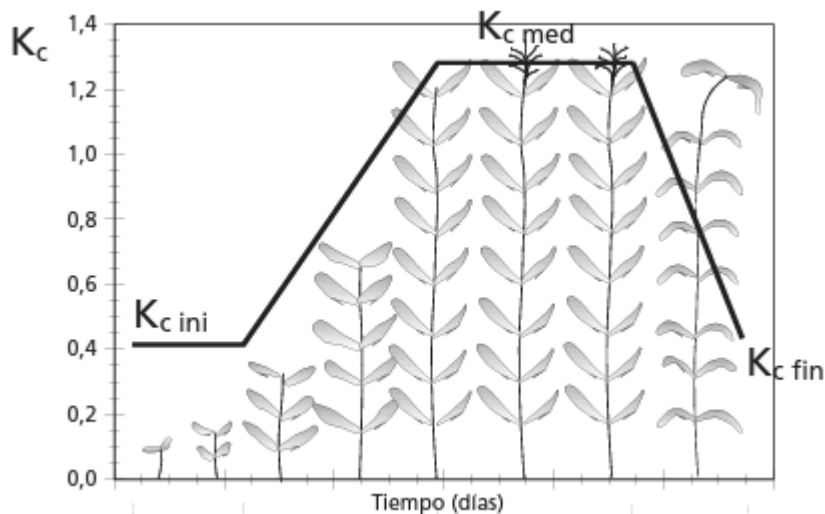


Figura 3. Curva Generalizada del Coeficiente del Cultivo

Fuente: Recuperado de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>

1.2. Relación Cultivo, Textura, Clima y Humedad

Como se mencionó en el apartado anterior, todos los cultivos poseen necesidades hídricas distintas, además, cada textura del suelo posee una capacidad de retención de humedad diferente, que se ve afectada por las condiciones climáticas y es por esta razón que el estudio de estas variables es de suma importancia a la hora de diseñar los sistemas de riego.

1.2.1. Textura

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (FAO, 2007). Con la finalidad de determinar la clase textural del suelo en cuestión se utiliza el diagrama triangular realizado por el USDA, mostrado en la figura 4.

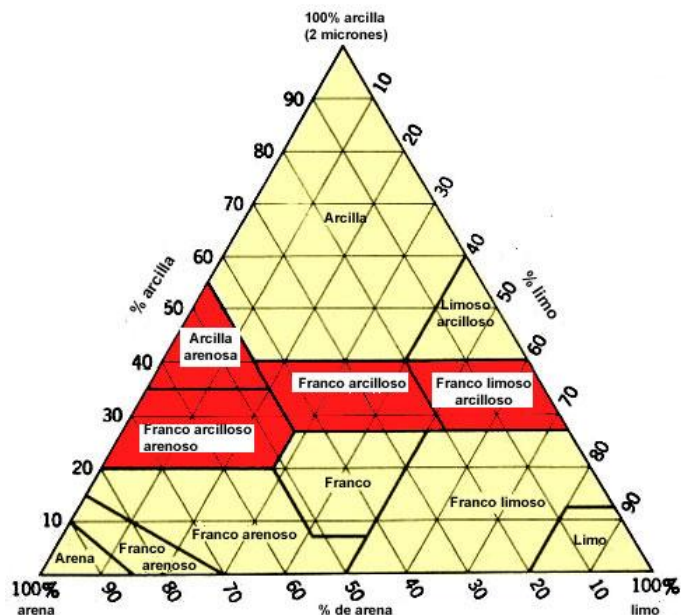


Figura 4. Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas, de acuerdo con el USDA

Fuente: FAO, 2017(<https://n9.cl/5zp80>)

Cada una de estas texturas cuenta con un peso específico aparente, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, tal y como se puede observar en el Cuadro AP1.1. Esto es de gran utilidad a la hora de calcular el agua útil que es disponible para la planta según el tipo de suelo con el que se trabaja y así asegurar un aprovechamiento al máximo del recurso hídrico ya que se le brinda al cultivo la cantidad de agua necesaria lo que implica un desperdicio mínimo de este recurso.

Cuadro AP1.1 Valores típicos de humedad y peso específico aparente, según la textura del suelo.

Textura del suelo	Peso específico aparente (gr/cc)	CC base suelo seco (%)	PMP base suelo seco (%)
Arenoso	1,55 – 1,80	6 – 12	2 – 6
Franco arenoso	1,40 – 1,60	10 – 18	4 – 8
Franco	1,35 – 1,50	18 – 26	8 – 12
Franco arcilloso	1,30 – 1,40	23 – 31	11 – 15
Arcillo arenoso	1,25 – 1,35	27 – 35	13 – 17
Arcilloso	1,20 – 1,30	31 - 39	15 – 19

1.2.2. Evapotranspiración

La FAO (2006) define a la evapotranspiración como 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.

1.2.3. Humedad En El Suelo

La humedad en el suelo hace referencia a la relación porcentual de agua contenida en cierta cantidad de suelo; conocer el contenido de humedad de un suelo es un factor decisivo para un cultivo, ya que según Angella et al. (2016) la disponibilidad de agua en el suelo determina la mayor o menor dificultad que tienen las raíces para absorberla, de acuerdo con el potencial hídrico total. A medida que el suelo se seca, el potencial se hace más negativo (el agua está más retenida) y aumenta la dificultad de las raíces para absorber agua.

1.2.3.1. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

El suelo es el depósito de almacenamiento de agua, aire y nutrientes desde donde las plantas los extraen. La capacidad de almacenamiento y la disponibilidad para las plantas depende de las cantidades existentes y de las características de cada suelo (Chavarría-Vidal, 2021). La textura del suelo tiene una gran influencia en la curva característica de la humedad del suelo. Los suelos arenosos no retienen suficiente cantidad de agua disponible para la planta, éstos en general drenan más rápidamente y necesitan ser regados con más frecuencia que los suelos arcillosos (Enciso et al., 2008).

Existen diferentes medidas para identificar el nivel de humedad del suelo en función de la proporción de agua existente en los poros del suelo, estas son la capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), Agua disponible para la planta (AD)

1.2.3.2. Capacidad de campo

Se considera como el nivel de agua que un suelo puede retener sin que esta escurra o infiltre capas inferiores de suelo, Carrazón (2007) indica que en este estado de humedad los poros grandes contienen tanto aire como agua, mientras que los más pequeños están aún repletos de agua. A capacidad de campo, se considera que el contenido de humedad del suelo es el ideal para el crecimiento de los cultivos.

1.2.3.3. Punto de marchitez permanente.

Con forma el agua del suelo es absorbida por la planta o se evapora del mismo el nivel de humedad del suelo se va reduciendo (Carrazón, 2007), cuanto más se seca el suelo, más firmemente es retenida el agua por el suelo, y más difícil resulta para las plantas extraerla. Llegará un momento en que la extracción del agua por parte de las plantas no es suficiente para cubrir sus necesidades y empiezan a marchitarse y finalmente mueren

1.2.3.4. Agua disponible para la planta.

Este nivel de humedad del suelo indica la cantidad de agua que puede ser absorbida por la planta, sin que haga un gran esfuerzo por extraerla del suelo (Carrazón, 2007), podemos definir el

agua disponible para la planta como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente; dado que la CC y el PMP dependen de la textura del suelo, también dependerá de ella el agua disponible para la planta.

1.2.4. Déficit Permitido En El Manejo Del Riego.

Es el contenido de agua en el suelo al cual no se debe permitir bajar o llegar al punto de marchitez permanente para evitar el estrés de la planta por falta de agua y, por lo tanto, evitar la reducción en la producción. La diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y el déficit permitido debe ser la lámina de riego por aplicar. El contenido de agua que queda debajo de este límite es la cantidad de agua que queda en el suelo. El déficit permitido dependerá de las especies de plantas y variará de acuerdo con las temporadas de cultivo (Enciso et al., 2008).

1.2.5. Métodos Para Medir La Humedad En El Suelo

Ya que el contenido de humedad del suelo es de mucha importancia para identificar las necesidades de agua que existen, es de suma importancia también conocer de los métodos que se pueden usar para determinar este factor, Martin & Muñoz (2017), nos explican los siguientes métodos.

- Método del tacto: La determinación de la humedad del suelo por medio del tacto ha sido utilizada por muchos años por investigadores y agricultores por igual, es una técnica que toma un poco de tiempo y algo de experiencia lograr esto, pero es un método comprobado.
- Sonda de neutrones: Una sonda de neutrones contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos, estos neutrones rápidos son aproximadamente del tamaño de un átomo de hidrógeno, un componente esencial del agua; cuando los neutrones rápidos chocan con los átomos de hidrógeno, se vuelven más lentos y un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan.
- Resistencia eléctrica: El principio físico de estos dispositivos es que el contenido de humedad se puede determinar por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo. Entre más agua haya en la tierra, más baja es la resistencia.
- Tensión del suelo: Los tensiómetros miden la intensidad de la fuerza con la que el suelo retiene el agua. La mayoría de los tensiómetros tienen una punta de cerámica o porosa conectada a una columna de agua.
- Capacitancia eléctrica: Las sondas C utilizan un oscilador de corriente alterna para formar un circuito eléctrico en conjunto con el suelo.

1.2.5.1. Sensor de capacitancia eléctrica.

Son sensores que miden la constante dieléctrica del suelo mediante el uso de un capacitor, según Enciso et al. (2008). Estos sensores proporcionan las lecturas de los contenidos volumétricos de agua en el suelo a la profundidad a la que se colocan (m^3 de agua/ m^3 de suelo). Típicamente la humedad del suelo oscila de 0 a 0.4 m^3 de agua por m^3 de suelo. Estos sensores ya están precalibrados para usarse en una amplia gama de tipos de suelo. Sin embargo, para suelos con altos contenidos de arena (texturas gruesas) y suelos con altos contenidos de sal, la calibración estándar no será exacta.

Con lo dicho anteriormente, existen diversas maneras para determinar el contenido de humedad en el suelo, pasando desde métodos tradicionales y rudimentarios, hasta paquetes tecnológicos de

alta gama. Estas mediciones se realizan con la finalidad de obtener los beneficios de un cultivo con un contenido de humedad dentro de los rangos que este permite, siendo estos beneficios, mayor productividad y rentabilidad.

1.3. Diseños De Campo

Los levantamientos topográficos son herramientas fundamentales para la determinación y ubicación de puntos estratégicos dentro de un plano, hoy en día existen diferentes herramientas relacionadas con los Sistemas de Información Geográfica por sus siglas SIG, a partir de los cuáles es posible realizar un trabajo a partir de la utilización de dispositivos GPS, como lo son los RTK.

Los SIG surgen a partir de la necesidad de crear opciones más eficientes y rápidas dentro de la utilización y aplicación de nuevas herramientas tecnológicas, y manejo de datos digitales, generando múltiples ventajas dentro del análisis de datos topográficos, dentro de las principales ventajas que se mencionan en la literatura se encuentra la sencillez de actualización, facilidad de distribución, espacio de almacenamiento, facilidad y precisión de análisis y la facilidad de mantenimiento; esto dado que, los dispositivos RTK al funcionar con diferentes GPS, permite una actualización más tecnológica a partir de dispositivos Android o Windows, logrando así tener un mejor manejo de los datos generados, y exportación de los mismos (Víctor Olaya, 2020).

Ahora bien, dentro de los datos que se utilizan en los SIG, existen los que son de fuentes primarias y fuentes secundarias, los datos primarios son aquellos que se pueden emplear en un SIG y que, a partir de su originalidad son susceptibles a diferentes operaciones que se puedan realizar sobre ellos, logrando así realizar un manejo y análisis más exhaustivo y acorde a las necesidades del usuario, entre los principales ejemplos que se pueden encontrar son las imágenes digitales o los archivos obtenidos a partir de dispositivos GPS, como los utilizados en la realización de este proyecto.

Así mismo se encuentran los datos secundarios, los cuales se caracterizan por ser derivados de algún otro tipo de dato previo, el cual no se encuentra en un formato adecuado para su aplicación dentro de un software SIG, como por ejemplo se encuentran las versiones digitales de los mapas clásicos, así como datos procedentes de un muestreo o levantamiento tradicional, realizado por medio de una estación total, u otro dispositivo de uso topográfico que no incluya aplicaciones GPS.

1.3.1. Dispositivos RTK

Los dispositivos RTK son herramientas utilizadas en las diferentes áreas de la ingeniería y presentan un aporte fundamental en el análisis y realización de diferentes actividades de levantamiento, replanteo de puntos o inclusive funcionan para determinar volúmenes de tierra a extraer en una terraza o cualquiera otra actividad en la ingeniería. Estos dispositivos tienen la característica de funcionar mediante la aplicación de los GPS, los cuales tienen sus bases en la teledetección, y es que, la teledetección hoy en día es fundamental en el uso de los SIG, debido a la gran aplicación que tienen, especialmente en el hecho de acelerar procesos concretos dentro de los diferentes proyectos que se tengan.

La teledetección se basa en diferentes elementos, entre los que se encuentran, la fuente de radiación, que puede ser de origen natural o artificial, esta radiación es emitida por algunas de sus fuentes llega al terreno y en ese momento sufre una perturbación causada por los elementos de este,

esta perturbación será el objeto de estudio, en el terreno se encontrarán diferentes objetos que interaccionan con la radiación y mandan la señal de vuelta sobre una atmosfera, que será el medio por el cuál la señal interactúa con el terreno y permite el regreso de los datos al origen o también llamado receptor, que será el medio que recoja la radiación emitida y recopilará los datos de interés.

La teledetección no se podría generar sin la existencia de los GPS, que son base fundamental en los dispositivos de RTK que se detallarán más adelante, ahora bien, es relevante saber que son los GPS; los Sistemas de Posicionamiento Global, mejor conocidos como GPS, por sus siglas en inglés (Global Positioning System) son uno de los cuatro sistemas globales de navegación por satélites (GNSS) que se utilizan alrededor del mundo por las principales potencias y que permiten mejorar los procesos de localización en la tierra, y que además han podido emplearse en diferentes áreas de la ingeniería.

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélites o también denominados como sistemas globales de posicionamiento asistidos por satélites se forman de tres partes, las cuales son, un sector espacial, un sector de control y el sector usuario, estos tres sectores en conjunto permiten determinar la posición de los objetos o de las personas sobre la tierra mediante coordenadas geográficas, con errores inclusive de centímetros, lo que permite tener una buena precisión tomando siempre en cuenta el trabajo para el que se utilizan.

Dentro de los GNSS se encuentra el sistema ruso denominado GLONASS, el sistema de navegación Beidou desarrollado por el gobierno de China, GALILEO, el cual es el sistema de navegación utilizado en Europa y la costelación americana NAVSTAR misma que recibe el nombre más comúnmente de GPS.

El funcionamiento de un GPS se basa mediante una red de aproximadamente 27 satélites los cuales orbitan sobre la tierra de una forma sincronizada entre ellos con el fin de evitar choques entre sí, y también, con el objetivo de poder cubrir toda la superficie de la tierra. Cuando se utiliza un GPS con el objetivo de determinar una posición en particular, el receptor que se utiliza desde la tierra localiza de manera automática como mínimo 3 satélites que se encuentren en la red, de los cuales recibirá señales que le indicarán la posición y reloj de cada uno de ellos; una vez que se tiene las señales el receptor sincroniza el reloj del GPS y con ello, mediante un proceso de cálculos matemáticos relacionados con triangulación y determinación de ángulos entre el satélite y el receptor se logra obtener la ubicación de los puntos de interés así como la distancia que hay entre sí, siempre realizando un promedio entre varias distancias tomadas de manera automática por el receptor, para sí mejorar la precisión (Alcaraz, 2017).

Es bajo este concepto que trabajan los dispositivos RTK, en general, estos dispositivos son utilizados para tomar puntos dentro de un terreno, y posteriormente enviarlos a un formato GIS, este tipo de dispositivos se basan en la tecnología Real Time Kinematic, por eso sus siglas, basado en el inglés, esta tecnología es una de las muchas aplicaciones que se le puede brindar a los GPS. Este tipo de aplicaciones ofrece la posibilidad de generar un posicionamiento preciso en tiempo real, o sea, permite obtener coordenadas en un momento justo mediante la aplicación de la teledetección, pudiendo entrelazar los receptores GPS y la incorporación de distintos softwares de procesamiento, que son específicos para cada tipo de equipo (Ferreccio, 2006).

Es importante mencionar que, existen diferentes dispositivos GPS que ayudan a brindar coordenadas geográficas y facilitan la georreferenciación, sin embargo, estos dispositivos se diferencian de los RTK debido a que estos últimos tienen la capacidad de generar replanteos, así también, permiten obtener una distribución homogénea de datos en el relevamiento y controlar maniobras con exactitud, entre otras funciones que facilitan el diseño de obras en ingeniería.

Los dispositivos RTK cuentan con dos partes fundamentales, que deben funcionar simultáneamente para obtener las georreferenciación más adecuadas, estas son la base y el Rover, es importante recalcar que, sea cual sea la marca del dispositivo este siempre contará con ambas herramientas, la base, se caracteriza por ser el punto de referencia a partir del cual se empezará a generar la medición, mientras que el Rover o también denominado Móvil es el dispositivo que estará en movimiento y que se utilizará para generar la georreferenciación de los puntos de interés, así también, se encuentra el controlador, que se caracteriza por ser un dispositivo tecnológico, ya sea Windows o Android, en el cual se encuentra instalado el software especializado para la utilización de los RTK y que además permite la conexión de la base y el Rover, y además, permite la obtención de puntos, vista de mapas en línea, colección y extracción de los puntos del levantamiento obtenidos.

Existen diversos dispositivos RTK en el mercado, cuyas características y aplicaciones se han ido incrementando significativamente, llegando a tener hoy en día múltiples ventajas y opciones para desarrollar modelaciones y toma de puntos dentro de los terrenos de interés, en este caso es importante estudiar las características de dos de estos dispositivos.

En primera instancia se encuentra el RTK Geomax, este utiliza un receptor GNSS tipo Zenith25 Pro, que ofrece un rendimiento máximo y permite la toma de puntos en un radio aproximado de 3 kilómetros desde la base hasta la ubicación del Rover, este tipo dispositivo trabaja con una menor cantidad de satélites, comparado con las nuevas tecnologías RTK, por otra parte, su mantenimiento y cuidado es esencial para un buen funcionamiento, por lo que no puede tenerse bajo fuertes lluvias dado que, al entrar humedad al dispositivo este puede deteriorarse y la transmisión de señales se vería gravemente afectada, así mismo, como se mencionó con anterioridad se requiere de un conector, que para los dispositivos Geomax trabaja con un formato Windows, por lo que dentro del ámbito de la agilidad de los procesos este cuenta con un formato más robusto comparado con los dispositivos Android, así mismo, la aplicación requerida se denomina FieldGenius, que es una app proveniente de Microsurvey, se caracteriza por ser una opción que facilita la colección de datos obtenidos a partir del dispositivo Geomax, pudiendo a partir de esta extraer archivos en formato shape para su posterior análisis en un SIG o en otros formatos requeridos. La conexión que se debe realizar en FieldGenius es más laboriosa, por lo que, para poder generar un trabajo rápido y preciso es fundamental conocer las coordenadas base y con ello agilizar el proceso (Ferreccio, 2006).

Ahora bien, los RTK tipo CHC cuentan con un formato más moderno dentro de los dispositivos GPS, ya que trabajan con un sistema Android que permite una mayor agilidad en los procesos de conexión y toma de puntos, esto debido a que cuenta con un controlador inteligente con la aplicación LandStar 7, cuya conexión con los dispositivos base y Rover es más sencilla al momento de realizar, por lo que los tiempos de conexión se reducen, logrando generar el trabajo de forma más rápida, y es que, el receptor i50 GNSS integra tecnología de posicionamiento y comunicación en una unidad robusta que fue diseñada para brindar flexibilidad en el trabajo. Al

igual que el RTK Geomax, el CHC puede tomar puntos a un radio aproximado de 3 kilómetros, sin embargo, este dispositivo cuenta con un radio externo que permite amplificar ese radio hasta los 20 kilómetros aproximadamente, permitiendo un mayor acceso a zonas complicadas y reduciendo el número de veces en que se tendría que mover la base de un punto a otro, reduciendo así la duración del trabajo.

Así mismo, esta tecnología incorpora aproximadamente 432 canales que se benefician de las señales GPS, GLONASS, Galileo y Beidou, proporcionando una calidad de datos más sólida en comparación con otros dispositivos, es importante recordar que, la obtención de una señal fija dentro de cualquier dispositivo RTK radica en la ubicación de los GNSS que orbitan en ese momento cerca del punto donde se realiza la medición, por lo tanto, una buena obtención de señal depende de la ubicación de los satélites y de cómo orbita la tierra en un momento preciso, por lo tanto, en un punto dado depende de la hora la conexión puede variar, así mismo, dependiendo de los obstáculos que se presenten la señal puede variar, siendo edificaciones grandes las que más afectan las señales, más sin embargo, mediante una búsqueda de señal o conexión es posible devolver el dispositivo a su estado fijo, el cual cuenta con un menor porcentaje de error.

1.3.2. Tratamiento De La Información

La información espacial es una de las herramientas más utilizadas actualmente en cualquier ámbito, ya que, a partir de la transmisión de señales por medios informáticos es posible crear metodologías de aplicación para la georreferenciación de puntos, esto cuando se trabaja en levantamientos topográficos con aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, el manejo de información espacial constituye grandes ventajas principalmente en relación con la consecuente ganancia en productividad, eficiencia y precisión en el procesamiento de análisis de mapas y de información pertinente a estos (Víctor Olaya, 2020)

Los datos espaciales se han clasificado como datos primarios y los secundarios, los primarios son aquellos que se pueden emplear en un SIG y que en su forma original son susceptibles a operaciones de manejo y análisis que incorporaran un SIG, en este grupo se encuentran las imágenes digitales o datos GPS que son obtenidos directamente mediante el empleo directo de un SIG. Mientras que, los datos secundarios se derivan de algún otro tipo de datos previo, el cual no es adecuado para su empleo en un SIG, como por ejemplo las versiones digitales de los mapas clásicos, datos procedentes de un muestreo o levantamiento tradicional (Víctor Olaya, 2020).

Olaya (2020) menciona que a la información espacial se le es posible brindarle alternativas remotas principalmente a partir de la utilización de herramientas SIG en dispositivos móviles que facilitan la operación de los procesos tomando en cuenta que se están emitiendo señales remotas que inclusive facilitan la identificación de errores en el campo, permitiendo así tomar decisiones relevantes en el momento justo, evitando una sucesión de errores que a mediano o largo plazo propiciarían errores de diseño, esto por ejemplo con la instalación de sistemas de navegación para la localización de puntos estratégicos ya sea para muestreo o cualquier otro interés característico.

Los datos espaciales de calidad son aquellos que puedan servir para alcanzar los objetivos de un proyecto concreto, logrando así dándole sentido a este, y es que, como cualquier tipo de datos, los datos espaciales no son perfectos, dado que puede contener errores que pueden llegar a ser irrelevantes o significativos con relación al análisis que se les está brindando, considerando esto,

y tomando en cuenta que los datos especiales llegan a partir de satélites a los dispositivos electrónicos se pueden dar errores que signifiquen pérdida de información o mal interpretación de resultados (Víctor Olaya, 2020).

La calidad de los datos es relevante para el correcto desarrollo de un proyecto, según Olaya (2020) la aparición de los SIG y el amplio crecimiento del volumen de datos espaciales disponibles y derivados de satélites se constituyen como un elemento fundamental en el ámbito geográfico, y es que, estos factores han favorecido a que el volumen de trabajo sobre datos espaciales sea mayor permitiendo utilizar una número elevado de datos distintos provenientes de diferentes constelaciones satelitales como la GPS, GLONASS, GALILEO y BeiDou, que son las más utilizadas y conocidas en las herramientas GNSS.

1.3.3. Métodos Del Tratamiento De La Información Espacial (SIG)

1.3.3.1. Tipos De Datos Espaciales (Vectoriales Y Ráster).

Las softwares relacionados con Sistemas de Información Geográficas permiten el análisis de los diferentes datos y modelos espaciales que se generan y pueden ser representados de diferentes formas considerando el propósito de los mismos, para el caso de las elevaciones estas se pueden representar como curvas de nivel, malla de celdas regulares, puntos regulares y red de triángulos irregulares, mientras que, en el caso de vías estos se pueden representar con una malla de celdas y/o un conjunto de líneas. Estas formas se pueden clasificar en dos grupos principales que son los modelos de representación ráster y modelo de representación vectorial (Víctor Olaya, 2020)

El camino que lleva desde la realidad hasta el conjunto de valores numéricos pasa por tres niveles, el modelo geográfico, modelo de representación y el modelo de almacenamiento, tomando en cuenta que el modelo geográfico es un ente más conceptual y el de almacenamiento más técnico inherente a la naturaleza de la información SIG, a partir de estos es que se da la representación en los dos modelos principales, que dependerán de la objetividad del proyecto que se esté desarrollando (Víctor Olaya, 2020).

El modelo ráster se basa en una división sistemática del espacio, la cual cubre toda la zona de estudio y se caracteriza por ser un conjunto de unidades elementales denominadas celdas, que abarcan toda la superficie y permiten recolectar información propia de cada una de ellas, aunque la malla de celdas puede contener información sobre varias variables de la zona de estudio es normal que se tenga una única variable dentro de ellas para con ello poder ejemplificar de mejor manera lo que se desea. La característica más importante de este modelo es su sistematicidad, dado que, la división del espacio en unidades mínimas permite llevar un patrón de tal manera que existe una relación implícita entre cada una de las celdas (Víctor Olaya, 2020).

En cuanto al modelo vectorial este no divide el espacio completamente, sino que lo define mediante diferentes elementos geométricos cada uno de ellos con valores asociados y características constantes, siendo la disposición de estos no sistemática, sino que guarda la relación con los objetos geográficos presentes en la zona, este modelo es similar al de entidades discretas dado que modeliza el espacio geográfico mediante una serie de primitivas geométricas que contienen elementos destacados de dicho espacio, estas primitivas pueden ser de tres tipos, puntos, líneas y polígonos. Cabe destacar que, los modelos vectoriales permiten visualizar de forma más detallada la

información propia de la zona en estudio, a partir de la tabla de atributos, que en algunos casos constituye toda la información requerida de la zona, e inclusive puede ser editada por el usuario de acuerdo a sus necesidades (Víctor Olaya, 2020).

1.3.3.2. Técnicas De Tratamiento Geoestadísticos (Interpolación TIN).

Toda información recolectada debe de tener un proceso de tratamiento, en el caso de los datos espaciales, se requieren realizar tratamientos geoestadísticos que faciliten el proceso de análisis y obtención de resultados de manera tal que se logren cumplir con los objetivos, esto principalmente en capas ráster. En diversas ocasiones dentro de los productos que se obtienen en el trabajo de campo no se tienen capas vectoriales por lo que se deben rasterizar estas capas para poder realizar el procedimiento respectivo (Víctor Olaya, 2020).

Existen diferentes métodos de interpolación los cuáles permiten rellenar las celdas restantes de una parte de la zona en estudio que no cuente con información esto a partir del conocimiento de valores puntuales, realizando estimaciones, para esto se aplican conceptos de estadística espacial, de modo tal que los puntos cercanos a cada celdas son los que determinan el valor estimado de esta, este hecho es una aplicación directa de la Ley de Tobler, la cual según Olaya (2020) menciona que; “Los puntos cercanos tienen mayor probabilidad de tener valores similares que aquellos separados por una distancia mayor” (p.260). A grandes rasgos un método de interpolación es una herramienta que permite el cálculo del valor de una variable en una coordenada para la cual este valor no es conocido.

La interpolación mediante redes de triángulos irregulares (Triangulated Irregular Network) por sus siglas en inglés TIN es una herramienta para representación vectorial que representa una alternativa modelar y eficiente para el almacenamiento de datos de elevaciones, y es que, para este tipo de interpolación el terreno se caracteriza mediante la definición de una serie de puntos de interés o representativos del mismo, que se conectan entre sí formando una red de triángulos con mayor densidad en las zonas donde son necesarios más puntos representativos para su correcta caracterización y menor densidad en las zonas llanas. A partir de esto el terreno queda dividido en triángulos los cuáles definen planos con características propias de pendiente y orientación espacial que caracterizan el relieve dentro de cada triángulo. La principal ventaja de este método es la capacidad de caracteriza el espacio únicamente con una fracción de sus puntos, extrayendo aquellos más característicos y reduciendo la complejidad a elementos sencillos (Victor Olaya, 2004)

1.3.3.3. Generación de Productos (Cartografía Temática-Parcelamiento)

La generación de los productos es uno de los procesos más significativos luego del procesamiento de los datos ya que permiten obtener un producto característico de la zona en estudio e identificar las características propias de forma tal que sea más sencillo realizar el análisis comparativo de los resultados. La generalización cartográfica como la menciona Víctor Olaya (2020) expresa alguna idea o información más resumida de modo tal que esta sea comprensible y pueda aprovecharse de la mejor manera posible, dentro de la cartografía esta generalización se relaciona con la adaptación de los elementos en un mapa para lograr que este sea lo más expresivo y claro posible.

De forma más clara, la generación y generalización se puede definir como un proceso que tiene como objetivo la producción de una imagen cartográfica legible y expresiva reduciendo el

contenido del mapa a aquello que sea posible y necesario representar, lo que quiere decir que, la generación de un mapa debe de contener los aspectos más relevantes del proyecto que se está ejecutando de forma tal que no se muestre más de lo necesario y el lector de mapa pueda identificar de una forma clara toda la información de su interés (Víctor Olaya, 2020)

En el caso de que se esté trabajando en un proyecto con varios productos por generar se deben de identificar las características propias de cada subzona en estudio de forma tal que se pueda identificar de forma rápida la ubicación de la misma y las diversas características que se desean tomar en cuenta, con base a esto, es necesario realizar un sondeo y determinación de necesidades propias de una zona en estudio, para con ello realizar un producto viable y que permita el buen análisis de los resultados obtenidos (Víctor Olaya, 2020)

Un estudio geomático detallado permite determinar aspectos importante como la topografía, forma, obstáculos, texturas del suelo, tomas de agua de la parcela, sobre el cual se va a diseñar un sistema de riego y el correcto análisis de estas variables garantizaría el éxito de un sistema de riego y todos sus beneficios que este conlleva.

1.4. Diseño Del Sistema De Riego.

Para el diseño de un sistema de riego se debe tomar en cuenta dos líneas fundamentales que se interrelacionan, siendo el diseño agronómico y el diseño hidráulico, además de los parámetros del terreno donde se va a trabajar.

1.4.1. Diseño Agronómico

El diseño agronómico para un sistema de riego consiste en calcular los parámetros necesarios para suplir las necesidades hídricas del cultivo por medio de una aplicación de una lámina agua, en función del tipo de suelo, parámetros del cultivo, condiciones climatológicas y eficiencia del sistema a utilizar. Para el correcto diseño agronómico se toman en cuenta las siguientes variables:

a) Lámina neta.

Etcheverry (2021) indica que la lámina neta es la cantidad de agua que se aplica al suelo para reponer el consumo evapotranspirativo del cultivo, que disminuyó la humedad aprovechable disponible, dejándolo en condiciones de máxima retención,

b) Eficiencia de riego

Según el Ministerio de Agricultura y Riego (2015), la eficiencia de riego es aquella relación que existe entre la cantidad de agua puesta a disposición de las plantas en su zona radicular y el volumen total suministrado en el sistema. Según el sistema de riego a aplicar así cambia este valor que se representa en porcentaje, para riego por surcos la eficiencia varía de un 40% a un 85%, para riego por aspersión de 50% a 90% y para riego por goteo va de 90% a 95% de eficiencia.

c) Lámina bruta

La lámina bruta se determina como la cantidad de agua aplicada por la lámina neta entre la eficiencia de riego del sistema.

d) Frecuencia de riego

Esta frecuencia se denomina al tiempo en la que se debe aplicar nuevamente la lámina con la finalidad de suplir la evapotranspiración real.

e) Tiempo de riego

Esta variable se conoce como el tiempo que debe durar el riego para aplicar la lámina bruta necesarias para suplir las necesidades del cultivo.

1.4.2. Diseño Hidráulico

En el diseño hidráulico del sistema están comprendidos los siguientes puntos:

a) Tuberías

Las cuales se denominan conductos que cumplen la función de transportar fluidos, en este caso el agua desde la toma hasta para los cultivos. Existen diversos materiales para su fabricación, como lo son, PVC, Acero, Plástico Corrugado, Asbesto de cements, Hierro Dúctil, Polietileno, entre otros. En un sistema de riego es común identificar dos tipos de tubería.

- Tubería de conducción principal, cuya función es el transporte del agua hasta los laterales.
- Tubería lateral, son encargados de transportar el agua desde la tubería de conducción hasta los emisores.

Como hay una circulación de un fluido dentro de las tuberías se sufre un fenómeno denominado pérdidas de carga, Mott (2006) explica este fenómeno de la siguiente manera “Un fluido que se encuentra en movimiento presenta resistencia a fluir debida a la fricción, entre sus propias partículas y con las paredes de la cavidad en que se encuentre. Parte de la energía se transforma en energía térmica que se disipa a través de las paredes de la tubería. La magnitud de la energía que se transforma de cinética a térmica depende de las propiedades del fluido, la velocidad del fluido, el tamaño de la tubería, acabado de las paredes y la longitud de la esta. A estas se les conoce comúnmente como pérdidas primarias.” Por otro lado, las pérdidas secundarias se deben a los accesorios que se le agregan a esta red, estos accesorios pueden ser tees, válvulas, contracciones, etc. (Araya, 2021) le otorga estas pérdidas a turbulencias locales, lo que ocasiona que la energía se transforme a energía térmica

b) Emisores

Estos son los encargados de conducir y aportar el caudal desde la tubería lateral hasta el cultivo.

Liotta (2015) determinó que existen dos grandes grupos de emisores, siendo los siguientes:

- Goteros: existen una gran variedad de goteros de diferente forma y configuración para disipar la presión. Los más utilizados operan con caudales entre 1 y 4 litros/ hora. Los principales goteros que se usan en la actualidad son:
 - De laberinto: son de largo conducto que obliga al agua a un recorrido en forma tortuosa y perder presión. Son de régimen turbulento, poco sensibles a la temperatura y a las obstrucciones (foto 15).

- Tipo Vortex (de botón): en este caso el agua después de atravesar un orificio ingresa a una pequeña cámara en forma tangencial originando un movimiento en espiral que ocasiona una pérdida de carga y luego sale en forma de gota.
- Cintas: poseen emisores, normalmente espaciados entre 0,20 a 0,60 m. su uso es más frecuente en cultivos de temporada (hortalizas) y trabajan con presiones inferiores a 10 m (1 kg/cm²). la pared de la cinta puede ser muy delgada (0,1-0,2 mm) por esta razón tienen bajo costo.

Las cintas de riego y los goteros laberínticos vienen de fábrica con los emisores ya incorporados, en una gran variedad de caudales y espaciamientos. También se denominan interlínea o “in line”. En cambio, los de botón o sobre línea “on line”, tienen la opción de poderlos insertar manualmente en el lateral de riego. Si los emisores tienen mecanismos de regulación de presión se clasifican en:

- Auto-compensados: tienen la particularidad de mantener el mismo caudal, aunque varíe la presión. El flujo es turbulento y en su interior poseen una membrana de silicona (diafragma) que se deforma por la diferencia de presión del agua antes y después de la misma, modificando el conducto de paso y manteniendo el caudal constante. Su uso es más frecuente en terrenos ondulados, con pendientes pronunciadas y para longitudes extensas.
- No-compensados: no tiene mecanismo de regulación de caudal y varía en función de la presión. Pueden funcionar con menor presión que los auto-compensados y son más económicos. Sin embargo, para no perder uniformidad de caudal ($\pm 10\%$), la longitud de los laterales debe ser menor.

c) Válvulas

Perez (2022) denomina las válvulas como un aparato mecánico que tienen el objetivo de iniciar, detener o regular el flujo de líquidos o gases en una conducción.

1.4.3. Diseño Asistido por Software

1.4.3.1. Irricad

IRRICAD es un paquete de diseño asistido por computadora con base gráfica desarrollado específicamente para diseñar sistemas de suministro de agua o riego presurizado. IRRICAD es mucho más que un programa de dibujo porque combina las ventajas del dibujo de CAD con potentes técnicas de análisis de redes y dimensionamiento de tuberías hidráulicas. Proporciona además una selección automática de adaptadores y conexiones de tubos, generando una lista completa de materiales (NelsonIrrigation, 2013). Esta herramienta permite diseñar un sinnúmero de diseños presurizados de sistemas de riego, además de facilitar un análisis complejo de los sistemas hidráulicos.

1.5. Métodos De Riego

Actualmente existen diversos tipos de riegos aplicados a los cultivos, sus aplicabilidades y beneficios varían según el método y a pesar de que se cuentan con cultivos diferentes, muchos de estos comparten sistemas de riego utilizados similares, dentro de los sistemas de riego más utilizados para estos cultivos se encuentran riego por surcos, aspersión, goteo y microaspersión. Los métodos de riego más comunes para la papa son por surcos y aspersión. En el cultivo de cebolla es común utilizar riego por surcos, aspersión o goteo en época seca, sin embargo, también es común no utilizar

riego en época lluviosa. Con respecto al cultivo de fresa es común encontrar el riego por aspersión o goteo, cuando es por aspersión se busca que sea una gota pequeña para que no dañe la inflorescencia. El riego por aspersión es el método de riego más comúnmente utilizado para el cultivo de zanahoria. Al igual que la fresa, el repollo es un cultivo que comúnmente se ve acompañado de un riego por goteo o aspersión, finalmente, el aguacate, utiliza sistemas de riego por goteo o microaspersión.

Una correcta programación del riego, así como la correcta escogencia del método de riego según el cultivo, permite la preservación del recurso hídrico además de cultivos con mayores rendimientos y a su vez disminuir costos y pérdidas en la producción.

1.5.1. Riego por goteo.

Tal y como se mencionó anteriormente, existen diversos sistemas de riego, que van desde el riego superficial hasta el riego a presión y la correcta escogencia de estos sistemas determina el éxito de la producción. Para esta correcta determinación primero se debe tener en cuenta la eficiencia del sistema de riego a utilizar, esta eficiencia se puede denominar como el desempeño o la calidad del riego utilizado, esta eficiencia se distribuye de la siguiente manera.

- Riego superficial 50% de eficiencia
- Riego a presión, aspersores y micro-aspersores 70% de eficiencia
- Riego por goteo, 90 a 95% de eficiencia.

Esto da un indicativo de que si existen situaciones donde el recurso hídrico es limitado, es recomendable el uso de un sistema de riego una eficiencia alta, por otra parte, utilizar un sistema de riego con alta eficiencia permite la preservación del invaluable recurso hídrico además de permitir una producción sostenible evitando desperdicios, estos sistemas de alta eficiencia son los de riego por goteo. Según Perez (2022), el riego por goteo consiste en aplicar riego por medio de mangueras delgadas o cintas, que tienen agujeros cada cierta distancia con goteros, los cuales permiten que el agua salga en manera de gotas localizadas y así las raíces captan el agua de mejor. Al ser un tipo de riego con un área de humedecimiento menor, aplica agua sólo donde está la planta y el ahorro del recurso hídrico es mucho más alto que en los otros sistemas.

Literatura consultada

Alcaraz, P. (2017). Levantamiento mediante GPS. Universidad Politécnica de Cartagena.

Angella, G., Frías, C., & Salgado, R. (2016). Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta.

Arauz, L. (2020, mayo 15). Voz experta: Es hora de impulsar un sector agrícola competitivo y vigoroso para salir de la crisis. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2020/05/15/voz-experta-es-hora-de-impulsar-un-sector-agricola-competitivo-y-vigoroso-para-salir-de-la-crisis.html>

Araya, J. (2021). DISEÑO DE DOS SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO PARA CAFÉ, EN DIFERENTES UNIDADES EXPERIMENTALES, PARA PRODUCTORES DE CAFÉ EN LOS CANTONES NARANJO Y GRECIA, EN ALAJUELA [Tecnológico de Costa Rica].

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/13735/TF9055_BIB303829_Julio_Araya_Rodriguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Beshir, S. (2017). Review on Estimation of Crop Water Requirement, Irrigation Frequency and Water Use Efficiency of Cabbage Production. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 05(07), 59–69. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.57007>

Bolaños, A. (1998). EL CULTIVO DE ZANAHORIA.

Carrazón, J. (2007). Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. FAO.

Carvajal, J. (2014). Implementación de una metodología participativa de estrategias de adaptación al cambio climático en recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del Río Reventado, Cartago, Costa Rica [CATIE]. <https://docplayer.es/89130711-Centro-agronomico-tropical-de-investigacion-y-ensenanza-escuela-de-posgrado.html>

Chavarría-Vidal, A. (2021). Primera parte: Almacenamiento insaturado de agua en un perfil de suelo. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5009>

Chinchilla, N. (2018, julio 27). TEC y MAG buscan que agricultores de Cartago utilicen tecnología para aumentar su producción. <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2018/07/27/tec-mag-buscan-agricultores-cartago-utilicen-tecnologia-aumentar-su-produccion>

Chinchilla, S. (2013, marzo). Fresa ¿Sabías que...? Consejo Nacional de Producción. http://www.infoagro.go.cr/Documents/CM_fresa_29-03-13.pdf

Enciso, J., Porter, D., & Périès, X. (2008). Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego [Sistema Universitario Texas A&M]. <http://www.euskobaratza.eus/wp-content/uploads/2016/02/Enciso-et-al-2008.-Uso-de-sensores-de-humedad-para-optimizar-el-riego.pdf>

Etcheverry, M. (2021). Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. En *Diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas de riego de espacios verdes: parques, jardines, áreas deportivas y recreativas*. Universidad Nacional de La Plata. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/83190/mod_resource/content/1/unidad_2_RASPA.pdf

FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo. En *ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN*.

FAO. (2007). Textura del suelo. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#:~:text=La textura del suelo puede,una elevada proporción de arena.

FAO. (2008). Año internacional de la papa. <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/pdf.html>

Ferreccio, N. (2006). Análisis de la técnica RTK. Editorial de la Plata.

Ferreira, R., Selles, G., Maldonado, P., Celedon, J., & Torres, A. (2006, mayo). Efecto de la macroporosidad y atmósfera del suelo en el estado hídrico del palto. V Congreso Internacional de Ingeniería agrícola, 208.

Fornaris, G. (2014). Conjunto Tecnológico para la Producción de Repollo, características de la planta. Universidad de Puerto Rico.

Garcia, M. (2008). Manual Zanahoria.

Granados, M., & Saborio, M. (2011). Problemas fitosanitarios de la cebolla en Costa Rica (1a ed.). Editorial Universidad de Costa Rica.

Guevara, K. (2019). Rendimiento de semilla de fresa (*Fragaria x ananassa*) de las variedades Festival, Albión y Oso Grande bajo cuatro tratamientos de vernalización [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/16299/1/45518.pdf>

Henkes, R., & Dunn, N. (1981). Consumo de papa con nuevas variedades y nuevos métodos de producción: el cultivo de papa puede extenderse a un número mayor de regiones. Boletín El Surco, 3, 1–11.

Herrera, V. (2002). Riego en áreas pequeñas. Las acciones del senara en este campo. Agron. Costarricense, 26(1), 73–83. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v26n01_073.pdf

Lahav, E., & Kalmar, D. (1983). Determination of irrigation regimes for an avocado plantation in spring and autumn. Australian Journal of Agricultural Research, 34, 717–724.

Leveratto, C. (2015). El cultivo de Papa. [https://inta.gob.ar/noticias/el-cultivo-de-papa#:~:text=El cultivo de papa se,uno\) para asegurar su brotación](https://inta.gob.ar/noticias/el-cultivo-de-papa#:~:text=El cultivo de papa se,uno) para asegurar su brotación).

Liotta, M. (2015). Riego por Goteo. UCAR.

Lipinski, V. M., Gaviola, S., & Gaviola, J. C. (2002). EFECTO DE LA DENSIDAD DE PLANTACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO DE CEBOLLA cv. COBRIZA INTA CON RIEGO POR GOTEO. Agricultura Técnica, 62(4). <https://doi.org/10.4067/S0365-28072002000400009>

MAG. (1991a). Aguacate. En ASPECTOS TECNICOS SOBRE CUARENTA Y CINCO CULTIVOS AGRICOLAS DE COSTA RICA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA.

MAG. (1991b). ASPECTOS TECNICOS SOBRE CUARENTA Y CINCO CULTIVOS AGRICOLAS DE COSTA RICA. (1a ed.). MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658.pdf>

MAG. (1991c). Repollo. En ASPECTOS TECNICOS SOBRE CUARENTA Y CINCO CULTIVOS AGRICOLAS DE COSTA RICA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA.

MAG. (2004). Estrategia Nacional para el Incremento en la Competitividad de la Actividad Cebollera. Foro Nacional de Cadena Agrolimentaria de la Cebolla.

MAG. (2007). Agrocadena de Fresa.

MAG. (2016). Minuta de la Comisión Nacional de Papa y Cebolla.

Martin, E., & Muñoz, C. (2017). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo?

Ministerio de Agricultura y Riego. (2015). Manual del cálculo de eficiencias para sistemas de riego. https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual_determinacion_eficiencia_riego.pdf

Montes, A., & Holle, M. (1990). El cultivo de las amarilidaceas cebolla, ajo y puerro. El Zamorano.

Mott, R. L. (2006). Mecánica de fluidos (Sexta Edic). Pearson.

Natsheh, B., Abu-Khalaf, N., & Mousa, S. (2015). Strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) Plant Productivity Quality in Relation to Soil Depth and Water Requirements.

NelsonIrrigation. (2013). IRRICAD. <https://nelsonirrigation.com/es/products/software/irricad>

Nucleo Ambiental. (2015). Zanahoria.

O'Neal, K. (2020, mayo 16). La agricultura costarricense se reinventa frente a la pandemia del COVID-19. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2020/05/16/la-agricultura-costarricense-se-reinventa-frente-a-la-pandemia-del-covid-19.html>

Olaya, Victor. (2004). Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno. <https://docplayer.es/27374201-Hidrologia-computacional-y-modelos-digitales-del-terreno.html>

Olaya, Víctor. (2020). Sistemas de Información Geográfica. CreateSpace Independent Publishing Platform (Amazon).

ONU. (2019). Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua. https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf

ONU. (2023). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

Perez, V. (2022). DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEIO A NIVEL PARCELARIO EN EL PROYECTO QUEBRADA LA MINA, FRAIJANES, SABANILLA, ALAJUELA. [Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/14041/TF9284_BIB307381_Vanessa_Perez_Matamoros.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Presidencia de la República de Costa Rica. (2021, junio 4). 120 Familias Productoras de Cartago Estrenan Reservorios de Agua. Presidencia de la República de Costa Rica. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2021/06/120-familias-productoras-de-cartago-estrenan-reservorios-de-agua/>

Presidencia de la República de Costa Rica. (2020). Sector Agropecuario Invierte ₡4.530 Millones para Mejorar Productividad en Cartago. Presidencia de la República de Costa Rica. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2020/09/sector-agropecuario-invierte-¢4-530-millones-para-mejorar-productividad-en-cartago/>

PROAIN. (2020). EL RIEGO EN LA PRODUCCIÓN DE CEBOLLA. [https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/el-riego-en-la-produccion-de-cebolla#:~:text=Demanda de agua en el cultivo de la cebolla&text=Las necesidades netas \(NN\) de,pluviometría del año de cultivo](https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/el-riego-en-la-produccion-de-cebolla#:~:text=Demanda de agua en el cultivo de la cebolla&text=Las necesidades netas (NN) de,pluviometría del año de cultivo)

Quesada, J. (2017). DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA DIFERENTES CULTIVOS DE LA ZONA NORTE CARTAGO. [Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9370/determinacion_requerimientos_agua_diferentes_cultivos.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Richmond, F., & Méndez, C. (2009). RENDIMIENTO DE 12 HÍBRIDOS COMERCIALES DE ZANAHORIA (*Daucus carota* L.) EN el CAMPO Y en la PLANTA DE EMPAQUE. Universidad de Costa Rica.

Salazar, N., & Benavides, J. (2007). CARACTERIZACIÓN DE LA AGRO CADENA REGIONAL DE CEBOLLA. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-9413.pdf>

Schroder, K., Guevara, A., Segura, C., Schroder, E., Rivera, L., Menocal, M., Remy, M., García, R., & Sánchez, S. (2010). Estudio de competitividad del cultivo de la cebolla en Costa Rica. <https://drco-mag.yolasite.com/resources/COMPETITIVIDADCEBOLLA%2826-04-2010%29FINAL.pdf>

Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. FAO Irrigation and Drainage Paper, 66. <https://www.fao.org/3/i2800s/i2800s.pdf>

Varela, I. (2011). Uso Eficiente del Agua en la Municipalidad de Cartago: Creación de un Modelo Reproducible [Tecnológico de Costa Rica]. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/721/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Actualmente ya existen problemas de,futuro \(Azofeida%2C 2004\).](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/721/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Actualmente ya existen problemas de,futuro (Azofeida%2C 2004).)

1.2 Apéndice 2. Metodología de abordaje del proyecto

1.6. Tratamiento De La Información

La información espacial recolectada en campo se constituyó por diferentes formatos conocidos dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), desde los cuáles fue posible la edición e identificación de las diferentes características presentes en campo, como lo son alturas, delimitación de parcelas, texturas de suelo y ubicación geográfica representativa para los temas de interés.

Dentro de este proyecto se desarrolló un trabajo en el cuál, luego de la recopilación de información espacial a partir de la utilización de los dispositivos RTK, fue posible la extracción de capas georreferenciadas en los sistemas conocidos en Costa Rica, y en base a esto, se realizaron las debidas ediciones dentro del software QGIS, conocido por su gran capacidad para el análisis de datos espaciales, y que, además facilita la modificación de datos a gusto del usuario, aspecto el cual, en este proyecto fue sumamente relevante para poder generar los productos de interés acordes a las necesidades requeridas.

Ahora bien, antes de obtener la información geoespacial, se desarrolló un trabajo de campo, el cuál consistió en la recopilación de datos dentro de las parcelas de interés. En total se trabajó en 44 parcelas ubicadas en la Zona Norte de Cartago, en las cercanías del Sanatorio Durán, y que son parte de la Sociedad de Usuarios del Sanatorio. Estos terrenos son pertenecientes a diferentes asociados de la SUA y cuyo propósito principal es lograr la productividad de sus terrenos, mediante de cultivos de algunas especies de cebolla, papa, zanahoria, repollo, fresa y aguacate, generando así una gran productividad dentro de la zona.

Para la obtención de los puntos de interés se desarrolló un trabajo en el cuál, en primera instancia se analizaron las parcelas más alejadas, para poder desarrollar el trabajo de la manera más cómoda posible, empezando por las parcelas ubicadas a una mayor altitud y terminando en las que se encontraban en zonas de más fácil acceso y con una altitud menor. En cada una de las 44 parcelas en estudio se tomaron puntos alrededor del lindero, así como también en puntos específicos del terreno donde se notarán diferencias de nivel que fueran relevantes para el posterior análisis de las curvas de nivel, que son de interés para el diseño de los sistemas de riego. Así mismo, dentro de algunas parcelas, se encontraban reservorios, a los cuáles también fueron delimitados de la misma manera.

Todo este trabajo de toma de información se realizó mediante la utilización de 3 equipos RTK, que fueron el GEOMAX, CHC y EMLID, en donde los 2 primeros dispositivos mencionados fueron los que más se utilizaron en las mediciones que se realizaron, así mismo, para la utilización de estos equipos fue necesario el uso de equipo topográfico perteneciente a la Escuela de Ingeniería Agrícola, como lo fueron trípodes, bastones, estacas, mazos, clavos, cintas métricas, y los equipos RTK.

Al llegar a campo, se instalaron los equipos y se realizaron las modificaciones respectivas, en donde, el principal objetivo fue instalar los dispositivos en formato “Fix” para así poder establecer una correcta exactitud y precisión de los datos, así mismo, dentro de las modificaciones que se realizaron se colocaron las coordenadas geográficas del punto de amarre, las cuáles, dependiendo de la modificación de los dispositivos RTK estas coordenadas se tuvieron que dar en forma de coordenadas cartesianas o geodésicas, por lo que se utilizaron algunas herramientas tecnológicas para la conversión de estas coordenadas.

Una vez realizados los levantamientos respectivos en cada una de las parcelas se extrajeron los datos de los conectores, estos datos fueron extraídos en formato shape y csv; esto dependiendo del dispositivo utilizado y del formato que fue seleccionado dentro del conector.

1.6.1. Métodos Del Tratamiento De La Información Espacial

1.6.1.1. Tipos De Datos Espaciales.

La información que fue recopilada se modificó dentro de QGIS, logrando así obtener los datos de interés, y es que, a partir de los levantamientos de obtuvieron capas tipo vectoriales,

calificadas como polígonos y puntos, cada una de estas capas representa las parcelas en estudio, así mismo, en base a estas capas, se realizaron una serie de recortes y modificaciones esenciales para poder generar nuevas capas, que permitieran un análisis exhaustivo de la información.

En primera parte, a partir de la capa vectorial “PlanoCatastro_ZonaNorte_Sanatorio_Edit” se realizaron las modificaciones de cada una de las parcelas, en donde fue necesario utilizar las herramientas de edición de capas vectoriales para realizar los recortes necesarios, esto debido a que, dentro de las capas de interés solamente fue necesario trabajar con las zonas de interés, cultivadas, por lo que, en base a los orto mosaicos que fueron generados en la primera etapa de este proyecto se colocaron sobre estos las capas de las parcelas y se realizó una edición dentro de las propiedades de esta, dejando sin fondo los polígonos, para con ello poder tener una visión clara de la capa ráster sobre la cual se realizó la respectiva edición.

Teniendo ya, una visión clara de todas las zonas se editó la capa de planos, seleccionando la herramienta “Conmutar edición” y posteriormente se añadieron polígonos en aquellas zonas donde se encontraran calles, bodegas o galpones dentro de las parcelas, así como reservorios, clasificando cada uno de los elementos, y añadiendo los mismos en una nueva capa, permitiendo así el recorte de la capa de planos, y con ello, logrando una delimitación en la que, solamente las zonas de cultivos fueron detalladas.

Así mismo, se realizó una revisión de los datos encontrados en las tablas de los polígonos y se eliminaron aquellos datos que no fueran de interés para el desarrollo del proyecto. Una vez que se finalizó la respectiva edición de las capas de los polígonos de las parcelas se guardaron las mismas, caracterizadas por el nombre de linderos o parcelas, una vez guardada la capa con todo el conjunto de parcelas, se seleccionaron una por una, y guardando de forma individual, para un posterior proceso.

Seguidamente se subieron las capas de puntos, que fueron tomadas, estas, en el caso de los archivos descargados como shape, solamente fueron subidas a QGIS a partir de la herramienta “Añadir capa vectorial”, mientras que, aquellos archivos en formato csv, fueron subidos a partir de la herramienta “Añadir capa de texto delimitado” con esta herramienta se modificaron los espacios correspondientes a la tabulación de los datos, para con ello lograr una homogeneidad en el formato, y los mismos fueran leídos por el programa sin problema alguno.

Una vez subidos los archivos de las capas, se realizó la modificación en la tabla de atributos, en donde, a partir de la calculadora de campos se colocaron nuevas columnas, correspondientes a la fecha y equipo con el que fueron tomados los puntos en el campo, esto se realizó con el fin de poder tener una identificación válida del levantamiento realizado, con toda la información necesaria para un buen análisis de información, además, las fechas de los levantamientos permitieron generar un orden, dentro de las visitas que se realizaron a la zona en estudio. Cada uno de los puntos de esta capa contaron con un ID, así también con las coordenadas Norte, Este y Elevación, además, de una descripción, que fue necesaria para aquellos puntos que constituyeron puntos de amarre o identificación de zonas de interés, como obstáculos encontrados en el camino o los diferentes reservorios que fueron identificados.

Ahora bien, con cada una de las capas de puntos debidamente modificadas se utilizó la herramienta de geoprocésamiento denominada unión con esta, se seleccionaron las capas de puntos, y se unieron, de forma tal que, todos los puntos levantados quedaran en una sola capa, para un mejor análisis. Así mismo, esta capa de puntos fue colocada sobre la editada, primeramente, que incluía las parcelas, esto para identificar la posible existencia de vacíos dentro del levantamiento, además, este proceso de comparación se realizó para comprobar la buena georreferenciación de los datos.

1.6.1.2. Técnicas De Tratamiento Geoestadístico.

Las capas ráster dentro del presente trabajo fueron minoritarias, más sin embargo, su uso fue clave para la generación de diversas capas vectoriales de interés para análisis posteriores que se debieron realizar dentro del proyecto, la creación de las capas tipo ráster se realizó a partir de la capa vectorial de los levantamientos unidos, que fue generada a partir de la unión de las capas de puntos, esta capa de puntos fue esencial para la creación del DEM a partir del cual se crearon las curvas de nivel de la zonas en estudio.

Para la creación de este DEM se utilizó la herramienta de interpolación TIN, en la cual se seleccionó la capa vectorial de interés, así mismo se colocó el tipo de geometría de la capa, que en este caso fue de puntos, se seleccionó el sistema de coordenadas de la capa, la cual fue CRTM05, misma que se trabaja dentro de Costa Rica, y posterior a esto, se delimitó el tamaño de píxel que se quería trabajar, en esta modificación fue necesario analizar las condiciones para las cuáles se requería utiliza el DEM, así como el correcto funcionamiento del software al realizar esta tarea, por lo tanto, considerando los términos de riego para los cuáles se debía utilizar esta capa, se seleccionó un tamaño de píxel de 1 metros, esto quiere decir que, cada uno de los píxeles que constituyen el ráster equivalen a un área 1 por 1.

Una vez formado el DEM este fue guardado en la carpeta respectiva, y, seguidamente se procedió a realizar la creación de las curvas de nivel, para esto, dentro de QGIS existe un apartado para la edición de capas ráster, en esta sección, específicamente en extracción se seleccionó curvas de nivel, una vez abierto el panel de modificación de propiedades se eligió el intervalo de las curvas, que para este caso fue de 1 metro, lo que quiere decir que las curvas se crearon cada metro, permitiendo una correcta representatividad de los datos de la zona en estudio, esta capa, fue guardada en la carpeta de interés.

1.6.1.3. Generación de Productos.

Luego de la extracción de cada una de las capas de linderos y las curvas de nivel, se realizaron una serie de mapas temáticos para cada una de las parcelas en estudio, estos mapas fueron creados a partir del generador de QGIS, cabe destacar que, antes de realizar los debidos mapas, se comprobó la existencia de cada una de las parcelas que se encontraban en análisis. Por lo

que, con los linderos delimitados se realizó una intersección entre la capa de texturas y las curvas de nivel, logrando que, para cada una de las parcelas se logra identificar la textura de los suelos y las curvas de nivel correspondiente a las zonas, la intersección realizada permitió el recorte de nuevas capas, correspondiente a la textura de los suelos por cada parcela y, además, se guardaron de forma individual las curvas de nivel para cada una de las parcelas.

Así mismo, se realizó un sondeo a nivel general de todos los usuarios de la SUA, mediante llamadas telefónicas, en las cuáles se les consultaron diferentes aspectos, como ubicación de la parcela, y cultivos que son sembrados en sus terrenos, esto para identificar cada uno de los detalles propios de las parcelas y realizar el debido diseño de riego de manera que permita cumplir con las necesidades hídricas según el tipo de cultivo.

Una vez recopiladas cada una de las capas en estudio, se empezaron a formar cada uno de los mapas para las parcelas, estos mapas son parte fundamental para la identificación de las características propias del terreno, y es que, dentro de cada una de las composiciones se colocó el lindero, la textura de los suelos, las curvas de nivel y los cultivos producidos dentro de la parcela, así mismo se colocó el título correspondiente el cuál fue propio para cada una de las parcelas en estudio, y, posterior a esto se extrajeron todos los mapas, con las características propias de cada parcela, para con ello tener la identificación y caracterización de cada uno de ellos.

Estos productos obtenidos fueron insumos necesarios tanto para la determinación del diseño de siembra como para los datos topográficos necesarios y geoespaciales para el diseño de riego.

1.7. Diseño De Siembra

Para el presente trabajo se debió de contemplar un diseño de siembra base, ya que no se puede concebir un diseño de riego sin antes, tener la forma, orientación y dimensiones de la cama de siembra, este diseño se realizó en función de la información obtenida del estudio topográfico, definiéndose una distribución en contorno, la cual consiste la colocación de las camas de siembra en paralelo a las curvas de nivel del terreno, ubicando dos líneas de emisores de riego que deben seguir la misma orientación de las camas.

1.8. Diseño De Riego

1.8.1. Diseño Agronómico

a) Lámina neta

Para el cálculo de la lámina neta se realizó con la ecuación 1.

$$Ln = \frac{CC - PMP}{100} * Pe * Prof * Ap \quad [1]$$

Donde,

Ln: Lámina Neta

CC: Capacidad de Campo

PMP: Punto de Marchitez Permanente

Pe: Peso específico del suelo

Prof: Profundidad de Raíces

Ap: Agotamiento Permisible

Para el diseño se realizará un análisis de diferentes escenarios, los cuales deben de respetar que el agotamiento permisible se mantenga en un 20-40% para aprovechar la bondad del método de riego de alta frecuencia y con esto mantener al cultivo muy cerca de los parámetros óptimos de humedad para que no sufra estrés.

b) Eficiencia de Riego

La eficiencia de riego se determinó según el sistema de riego a utilizar, en este caso se determinó la utilización de un sistema de riego por goteo con eficiencia del 90 al 95%.

c) Lámina Bruta

La lámina bruta se determinó con la ecuación 2, haciendo uso de la lámina neta y eficiencia de riego anteriormente calculado.

$$Lb = \frac{Ln}{Ef} \quad [2]$$

d) Frecuencia de Riego

La frecuencia de riego se determinó con la ecuación 3, haciendo uso de la lámina neta y evapotranspiración real. Debido a que no es practico tener una frecuencia de riego con decimales, se redondea hacia abajo y luego se vuelve a calcular la lámina neta con la ecuación 3 para esta frecuencia nueva y, por último, se calcula nuevamente la lámina bruta con la ecuación 2, con esta lámina neta calculada.

$$Fr = \frac{Ln}{Eto} \quad [3]$$

1.8.2. Diseño Asistido por Software

Para el diseño de los sistemas de riego se utilizó el software Irricad V10, de la siguiente manera. En primer lugar, se dio la importación de las cintas de goteo, las cuales se colocaron 3 por cama en contorno, seguidamente se seleccionaron para colocarle los valores de la cinta de goteo

seleccionada de acuerdo con las necesidades hídricas del cultivo, la textura del terreno y las condiciones climáticas, luego se dio la importación de las curvas de nivel de la parcela, estas curvas se obtuvieron luego de realizar el tratamiento de la información topográfica del terreno en cuestión. Con estos dos parámetros se procedió a trazar las tuberías laterales las cuales se trazaron a conveniencia, con el objetivo de trazar las distancias que cubrieran la mayor cantidad de cintas y así optimizar el uso de la tubería., para cada tubería lateral se colocó su válvula de control para su debida separación de zonas. Luego de esto se trazó la tubería principal con el suministro de agua, la válvula de esta tubería se colocó según la ubicación real de las tomas de cada parcela. Con esto se asignaron las zonas con su caudal determinado, verificando que este era menor al máximo establecido según cada la necesidad de cada zona. Seguidamente se asignaron los parámetros de diseño, seleccionando 2m/s como velocidad máxima en las zonas y en la tubería principal. Finalizando este paso anterior, se verificó que ningún elemento estuviera desconectado, con esto se procedió a diseñar la tubería lateral según la velocidad permisible, posteriormente se verificaron que los valores de la presión de la válvula y los mínimos y máximos de los emisores estuvieran dentro de los rangos aceptados, seguido de esto, se verificó adicionalmente que el caudal en las válvulas estuviera dentro de lo permitido. Para el diseño de la tubería principal se realizó de la misma manera que los laterales. Seguidamente, se verificaron los diámetros de las tuberías y los materiales seleccionados, fueran los correctos y de no ocurrir esto se realizó el cambio respectivo y analizaron los parámetros con este cambio. Una vez finalizado la modelación y el diseño asistido se verificaron que los rangos mínimos y máximos de velocidades, así como de presiones, estuvieran dentro de los permitidos para asegurar el caudal necesarios para las parcelas. Por último, realizaron reportes de mapas de presiones mínimas y máximas en las parcelas, así como de reportes de la cantidad de tubería, cantidad de cintas de goteo y válvulas con sus especificaciones. Con estos diseños y reportes se generaron los planos para cada parcela.

1.3 Apéndice 3. Caracterización de las unidades de producción

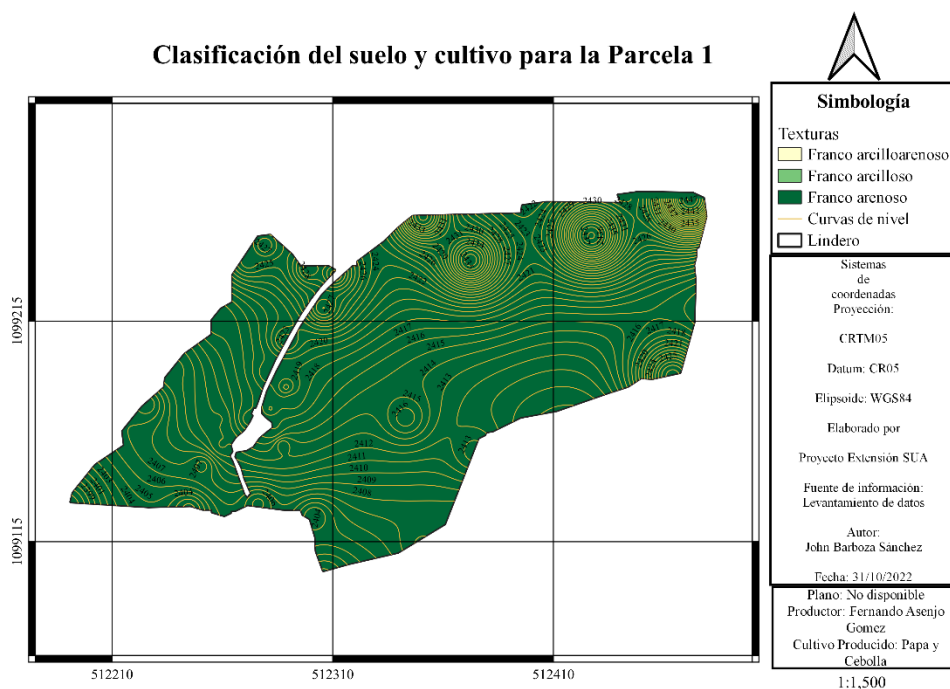


Figura 5. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 1.

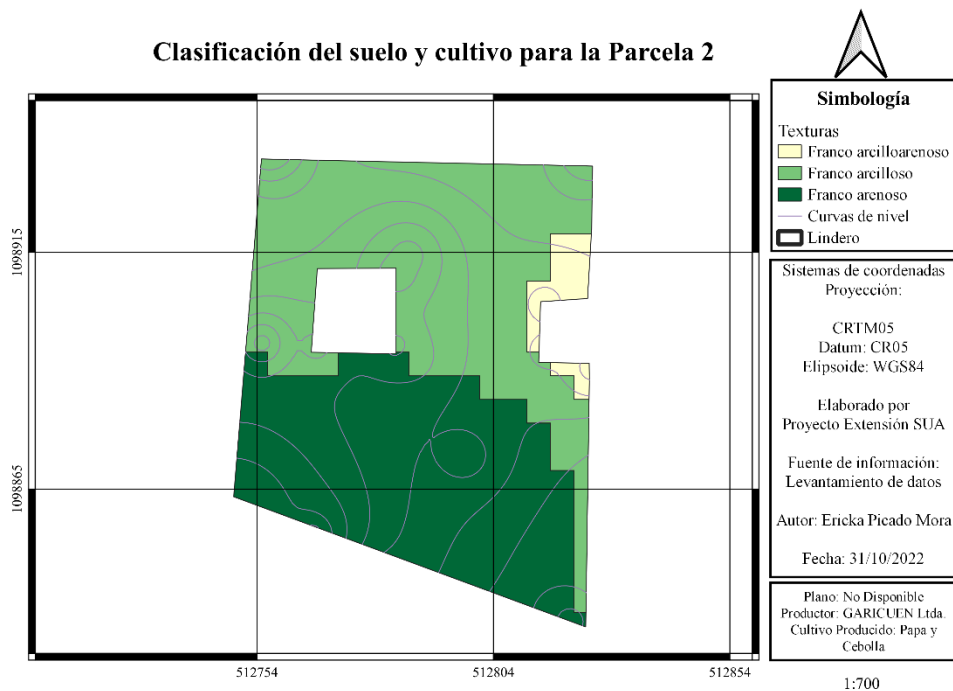


Figura 6. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 2.

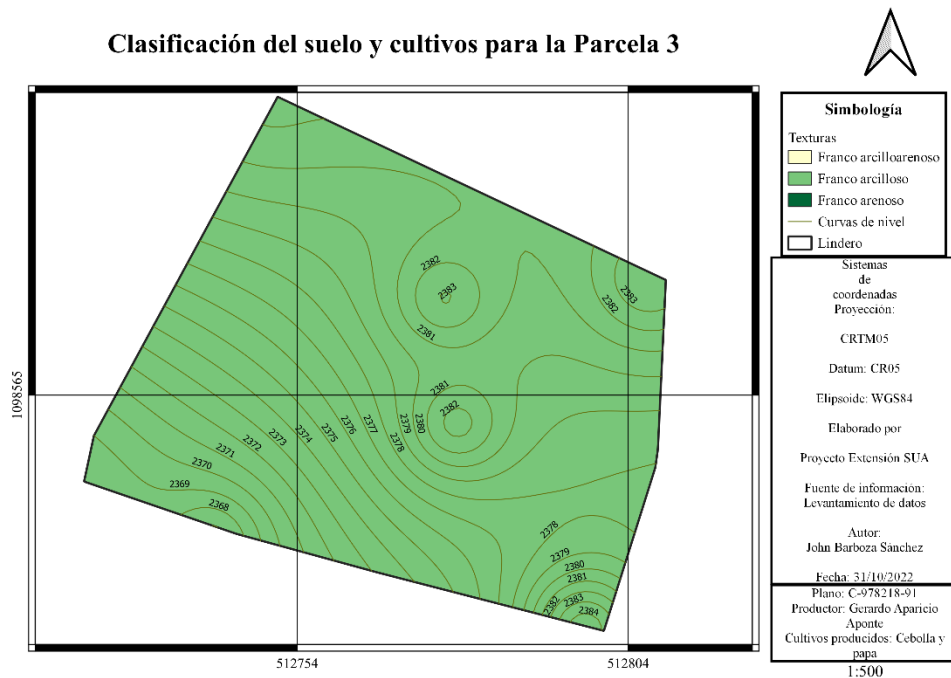


Figura 7. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 3.

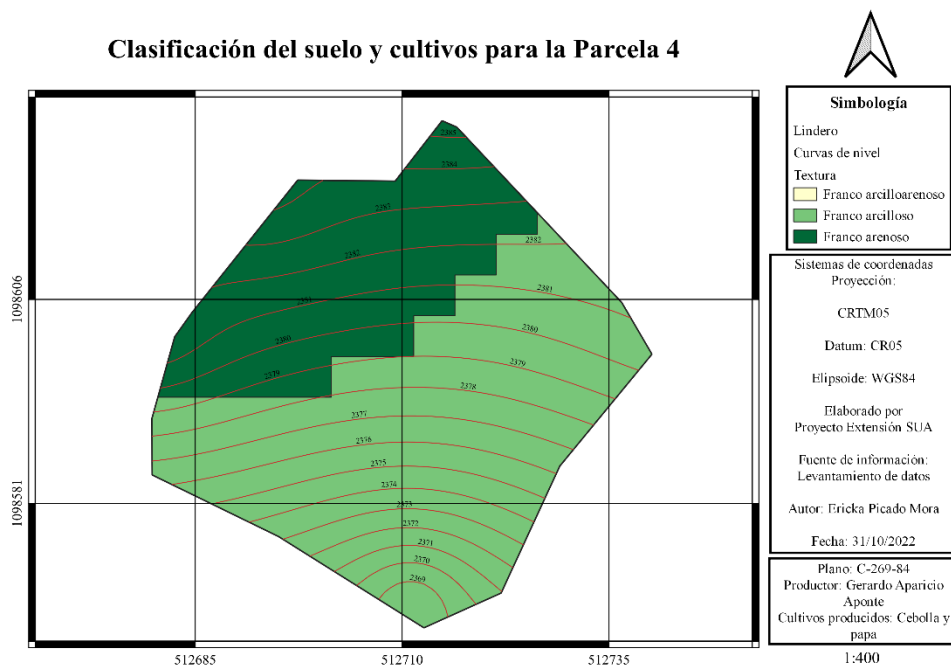


Figura 8. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 4.

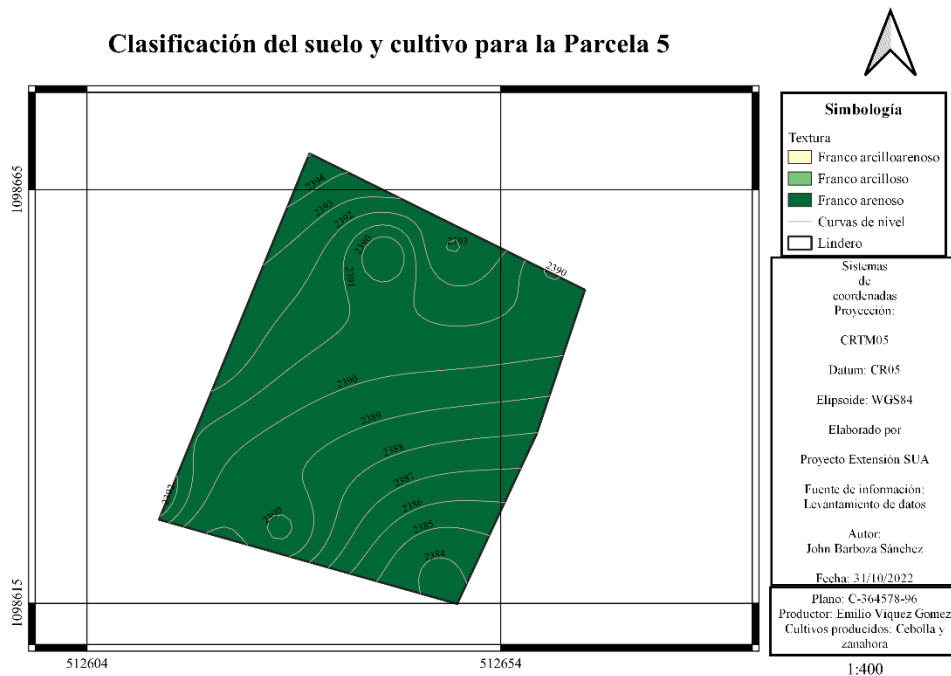


Figura 9. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 5.

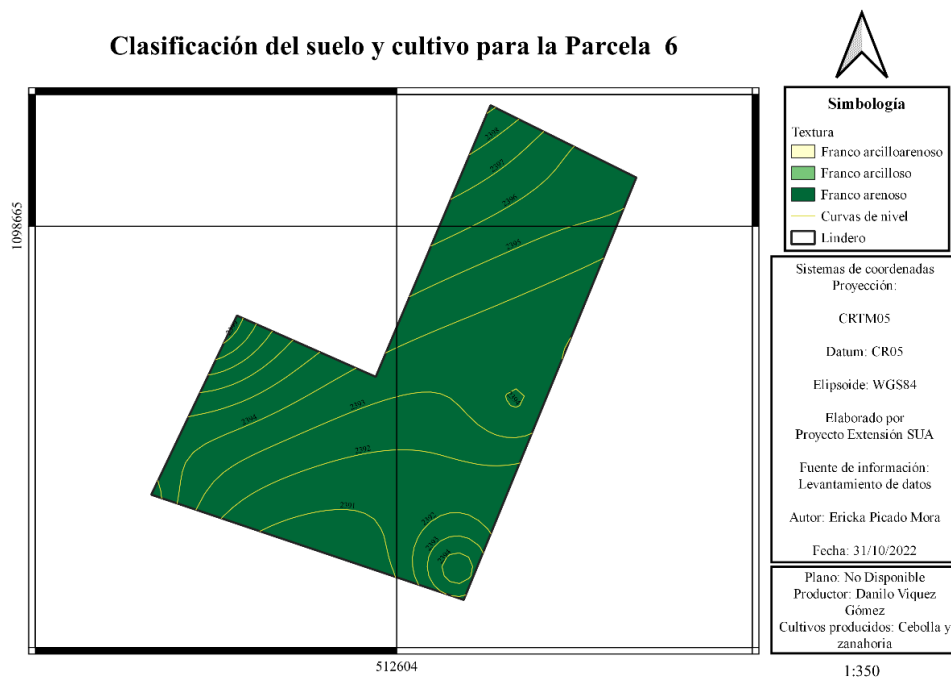


Figura 10. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 6.

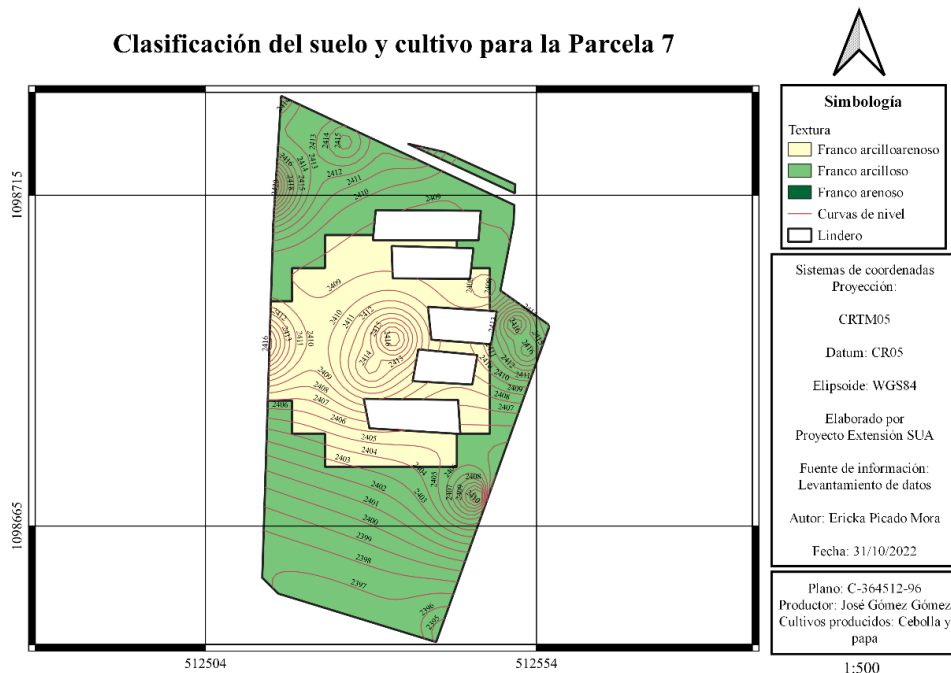


Figura 11. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 7.

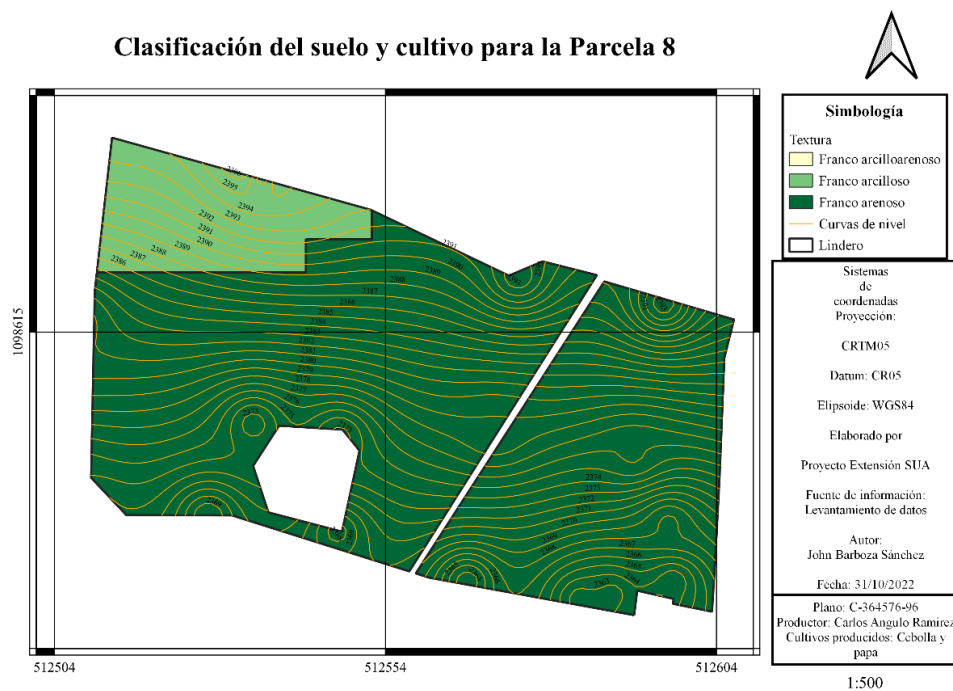


Figura 12. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 8.



Figura 13. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 9.

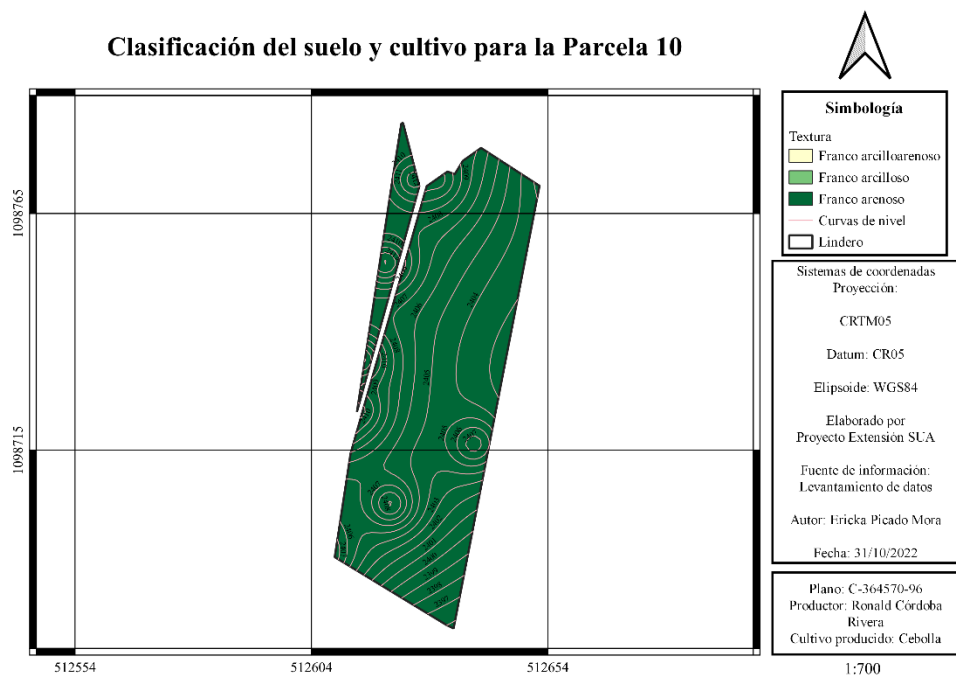


Figura 14. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 10.

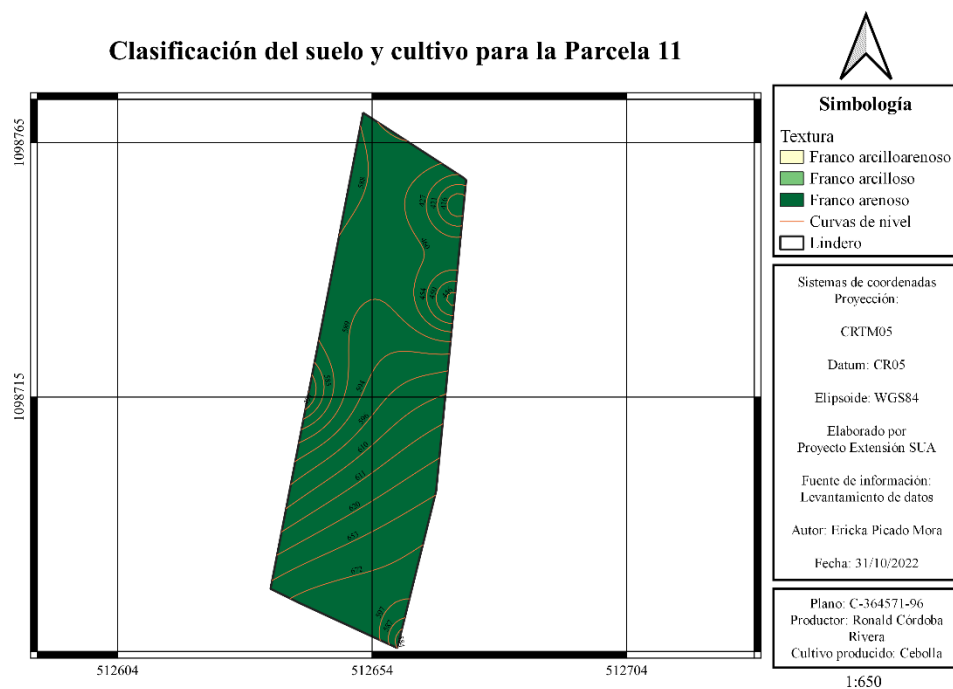


Figura 15. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 11.

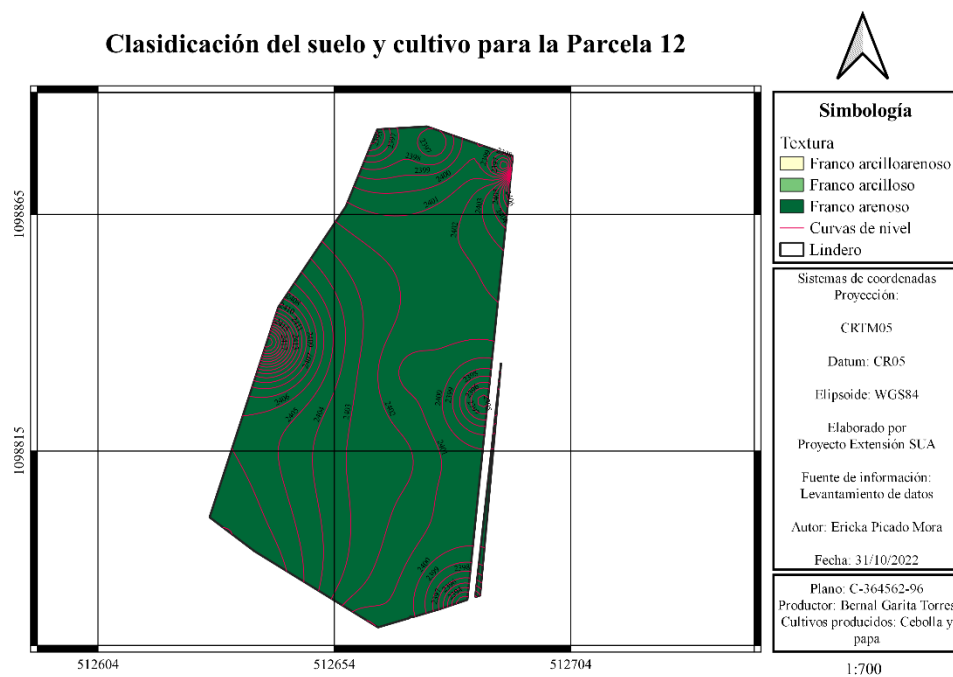


Figura 16. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 12.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 13

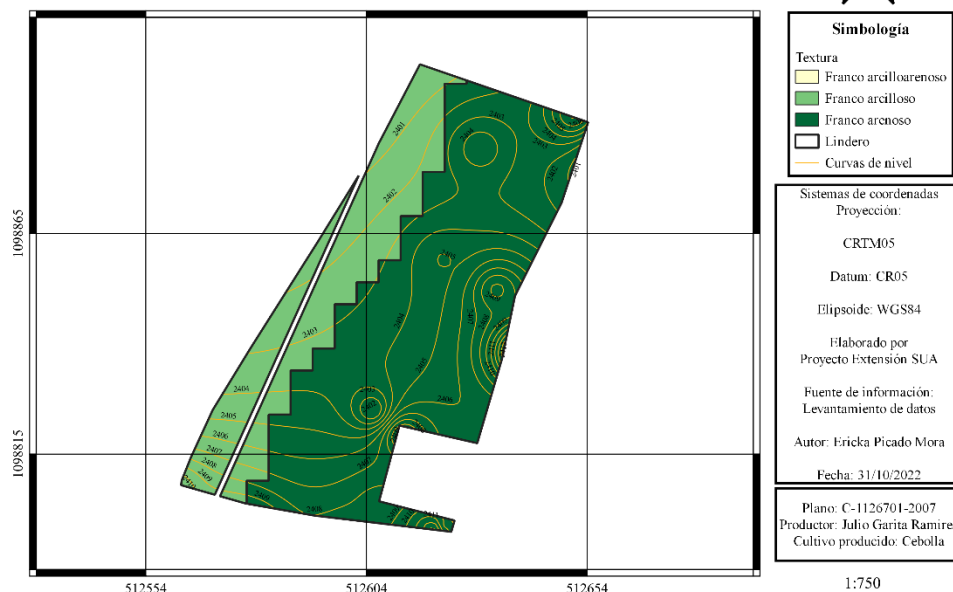


Figura 17. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 13.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 14



Figura 18. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 14.

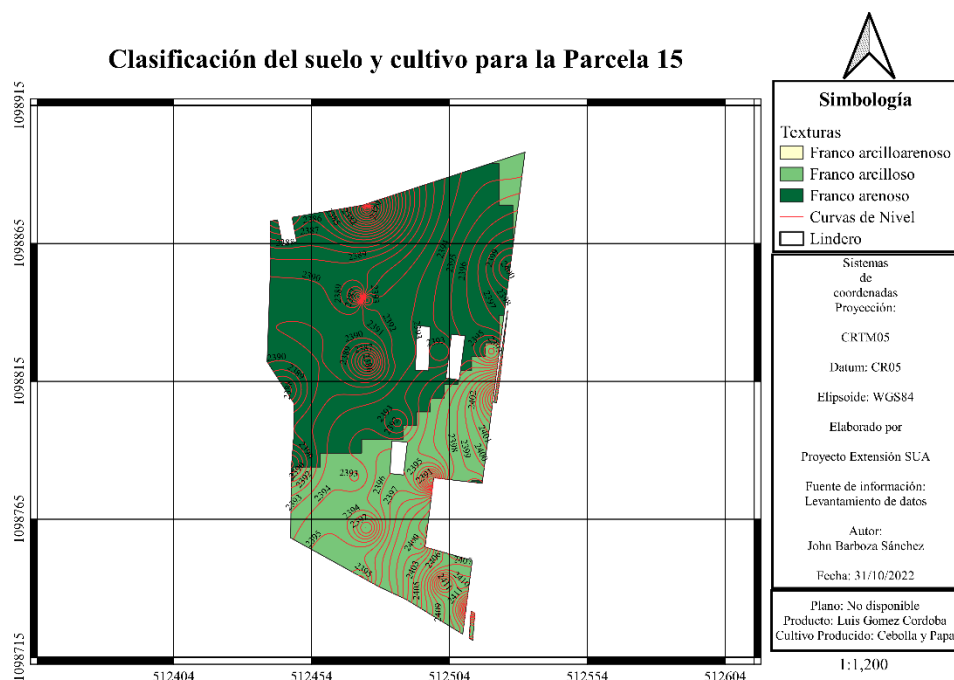


Figura 19. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 15.

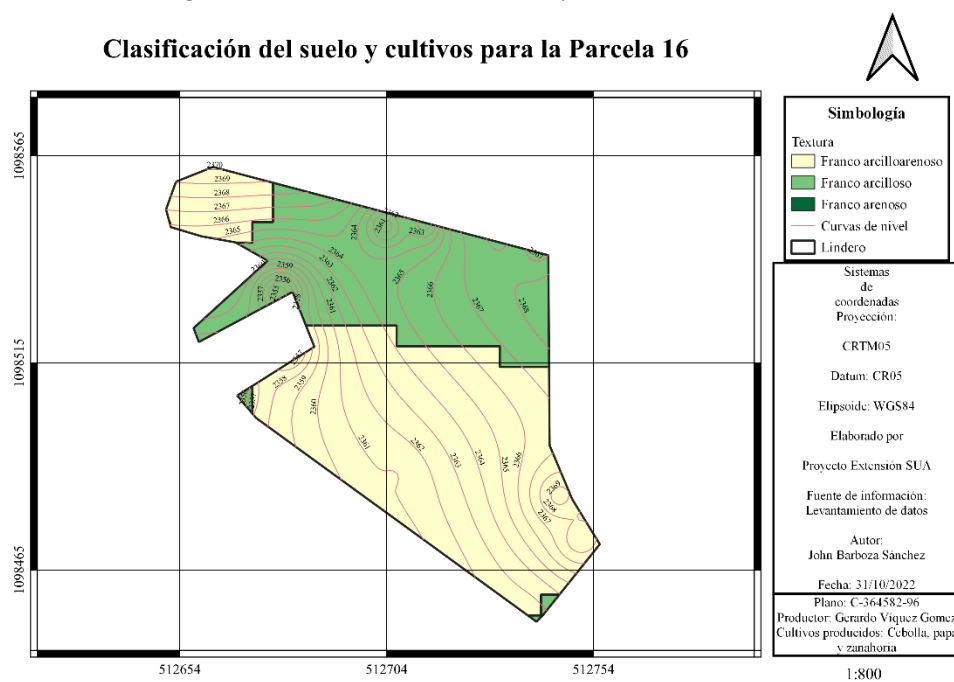


Figura 20 Clasificación del suelo y cultivo Parcela 16.

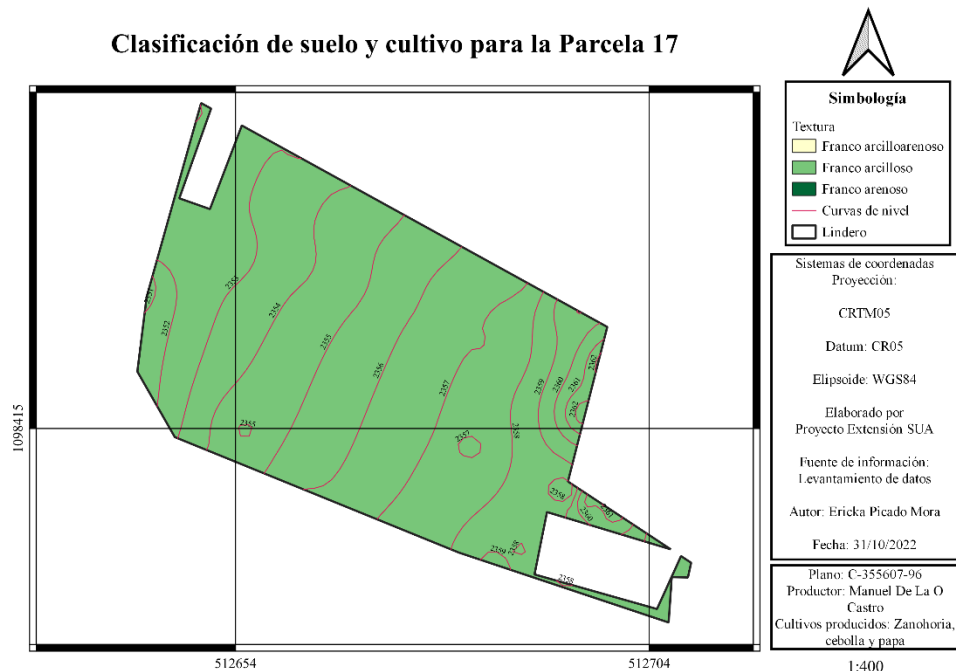


Figura 20. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 17.

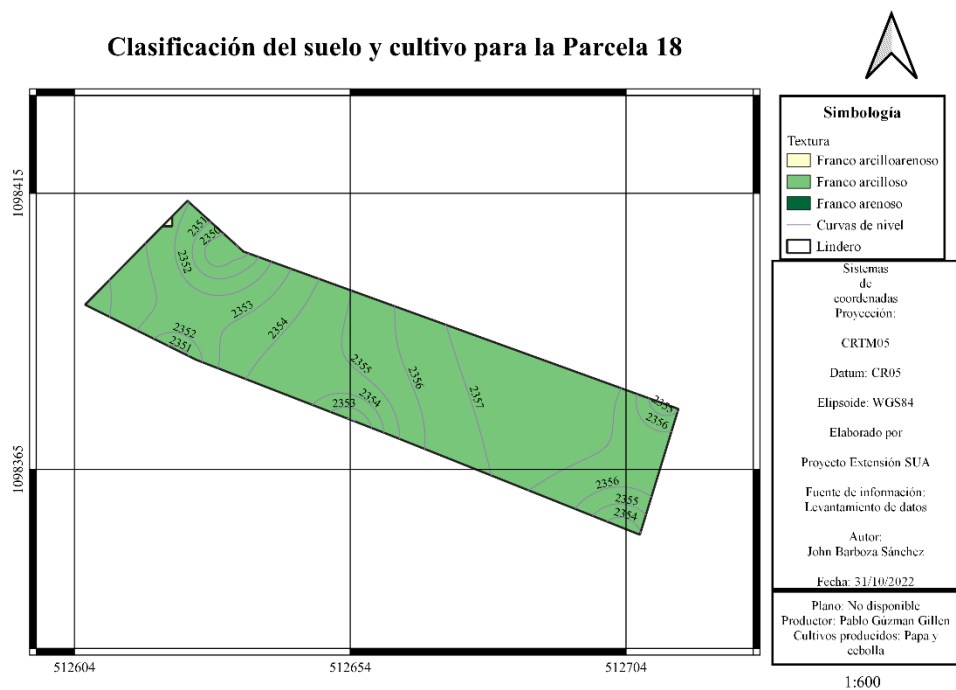


Figura 21. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 18.

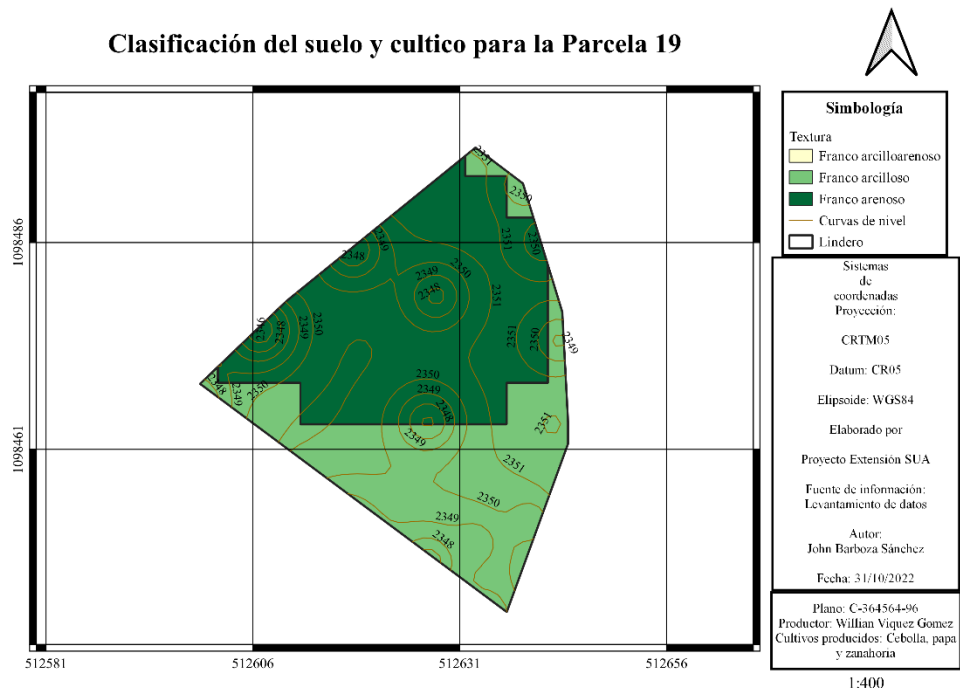


Figura 22. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 19.

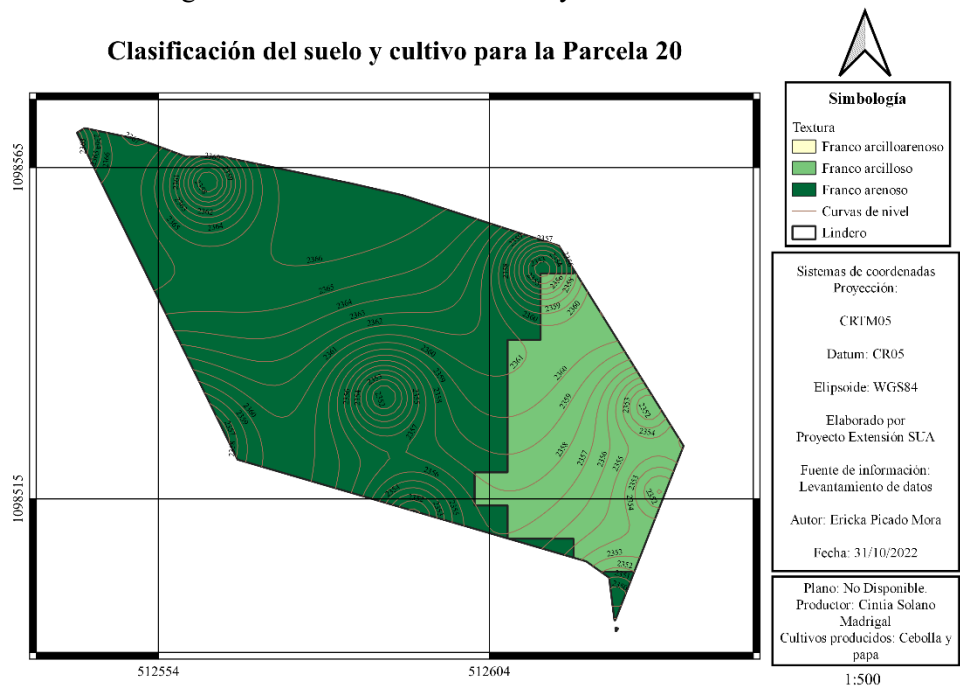


Figura 232. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 20.

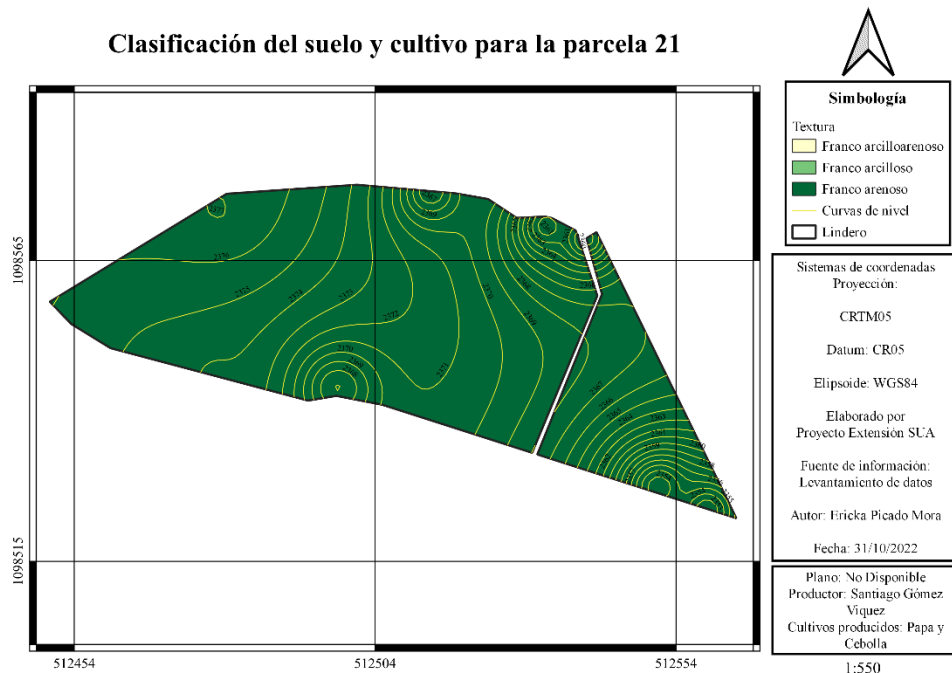


Figura 24. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 21.

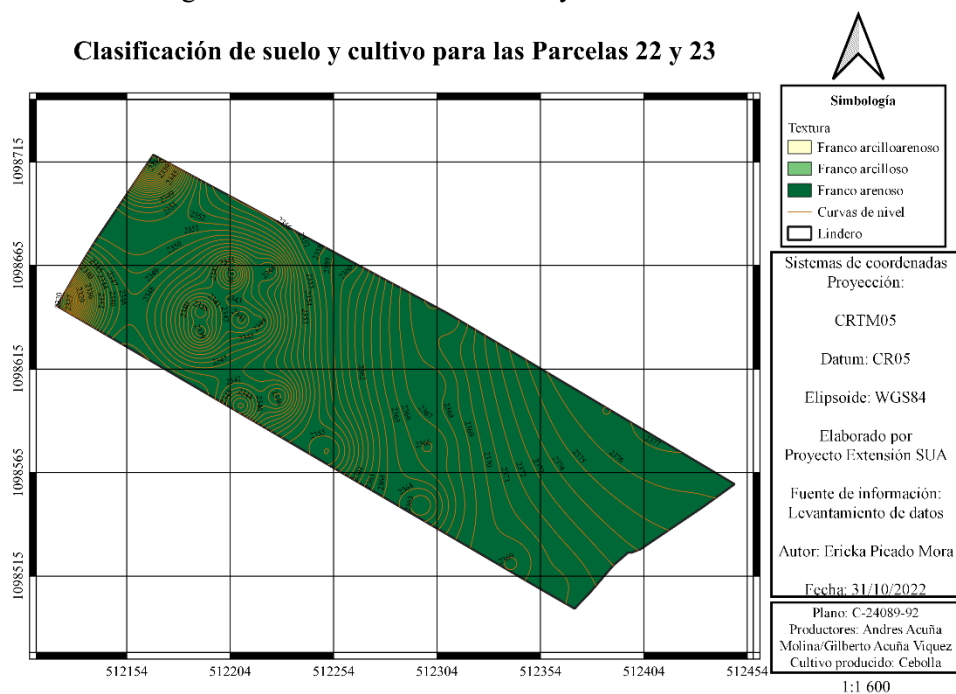


Figura 25. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 22 y 23.

Clasificación del suelo y cultivos para las Parcelas 24 y 25

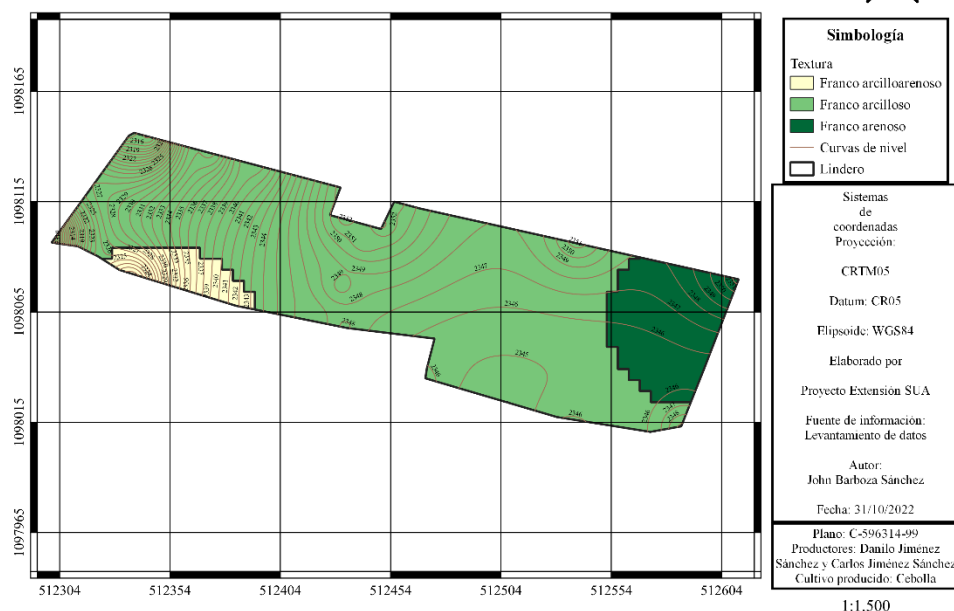


Figura 26. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 24 y 25.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 26

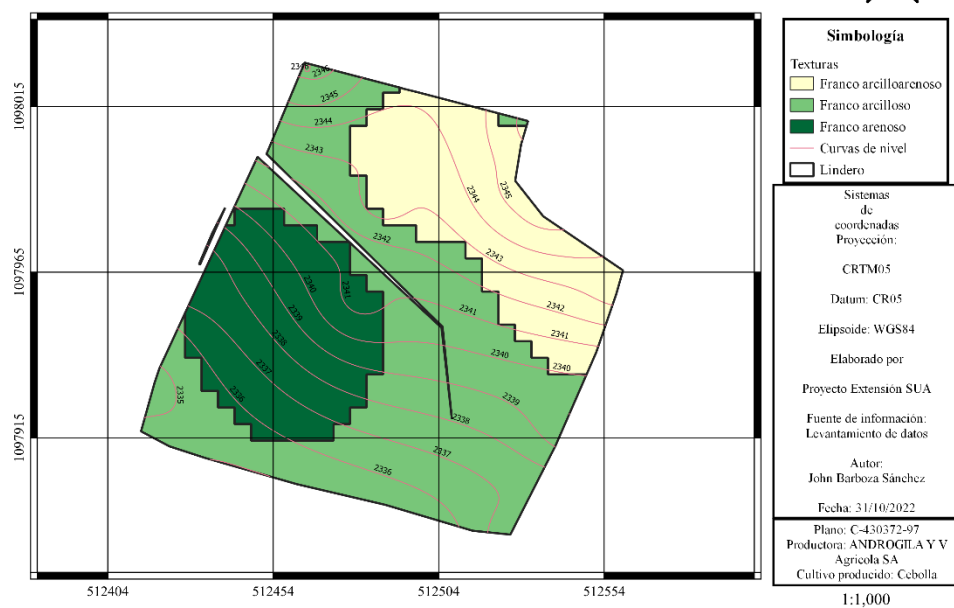


Figura 27 . Clasificación del suelo y cultivo Parcela 26.

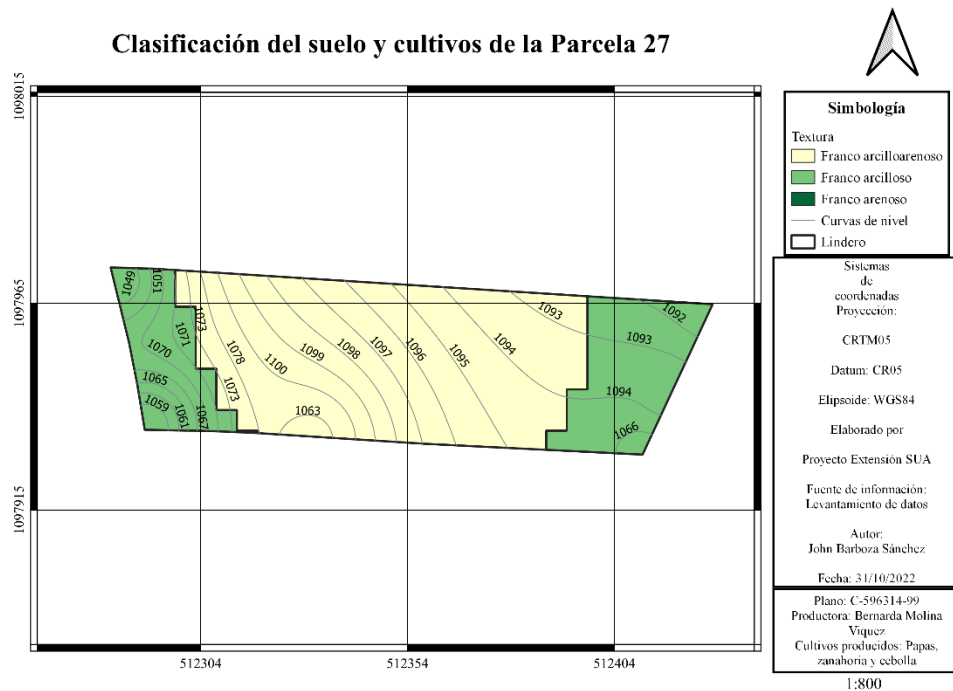


Figura 28. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 27.

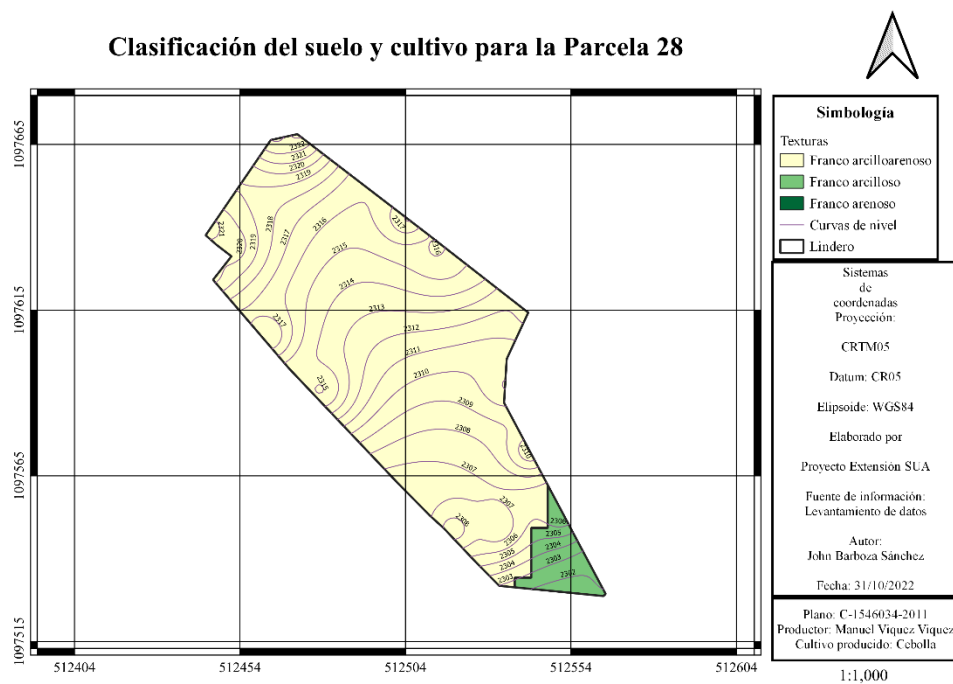


Figura 29. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 28.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 29

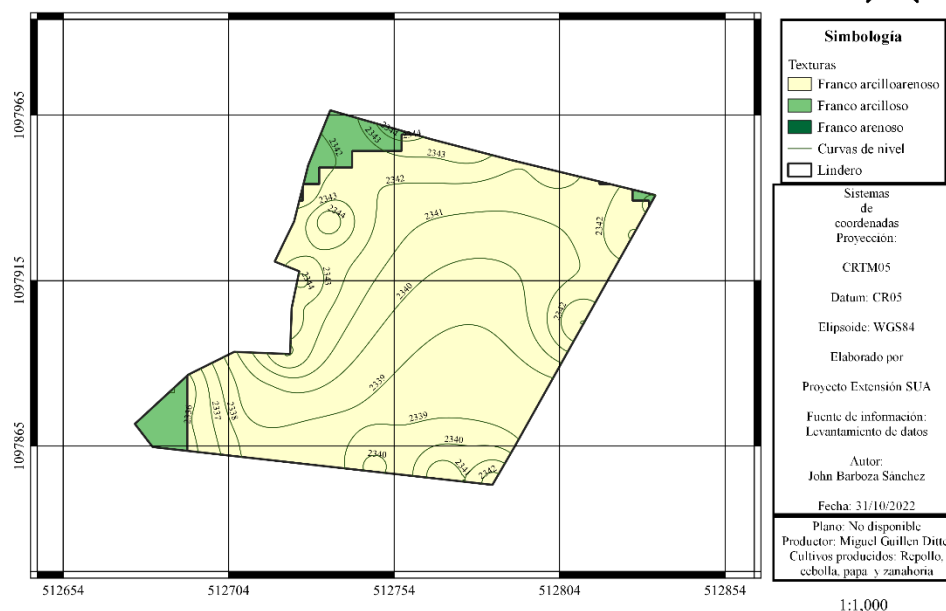


Figura 30. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 29.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 30

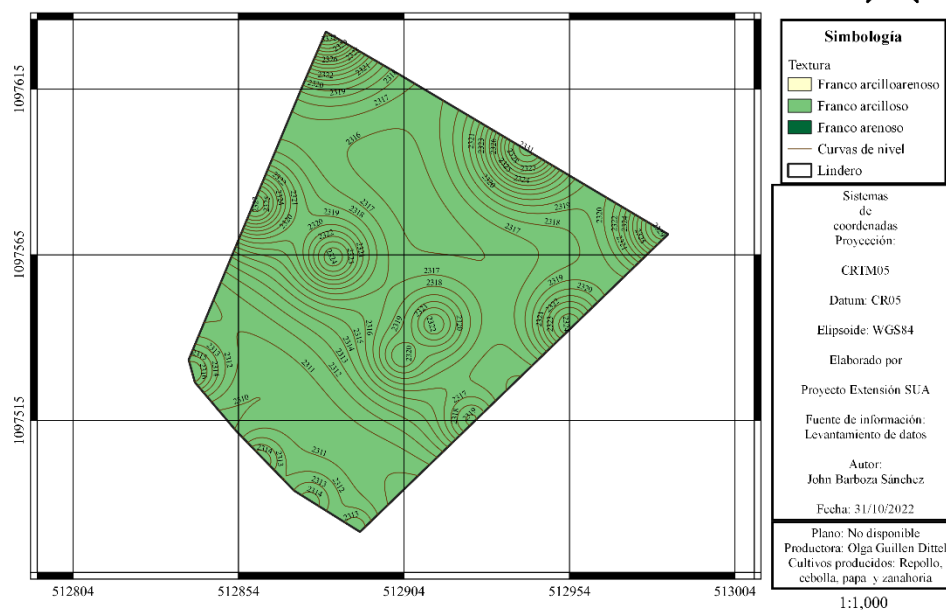


Figura 31. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 30.

Clasificación del suelo y cultivo de la Parcela 31

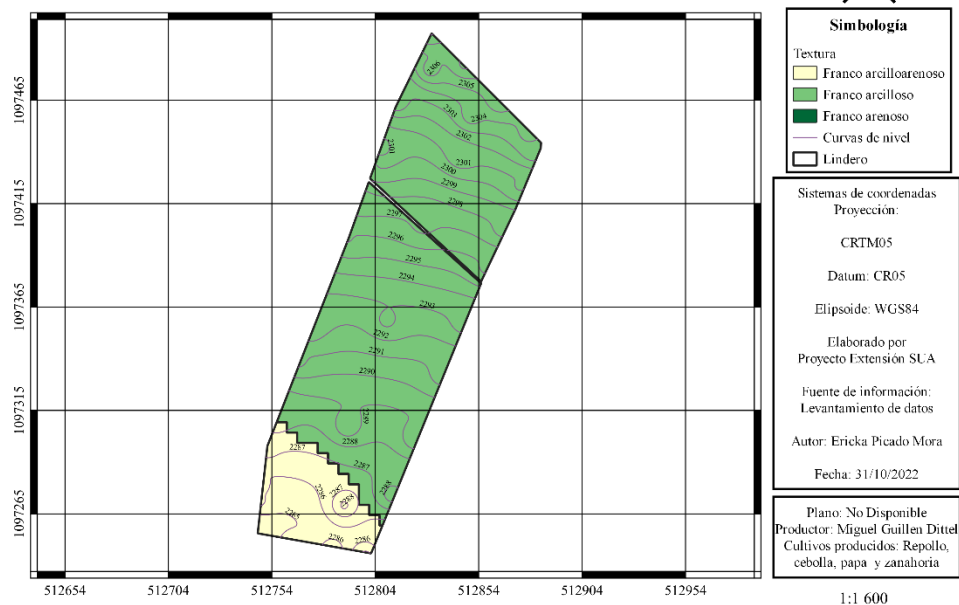


Figura 32. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 31.

Clasificación del suelo y cultivo para las Parcelas 32,33,34 y 35



Figura 33. Clasificación del suelo y cultivo Parcelas 32, 33, 34 y 35.

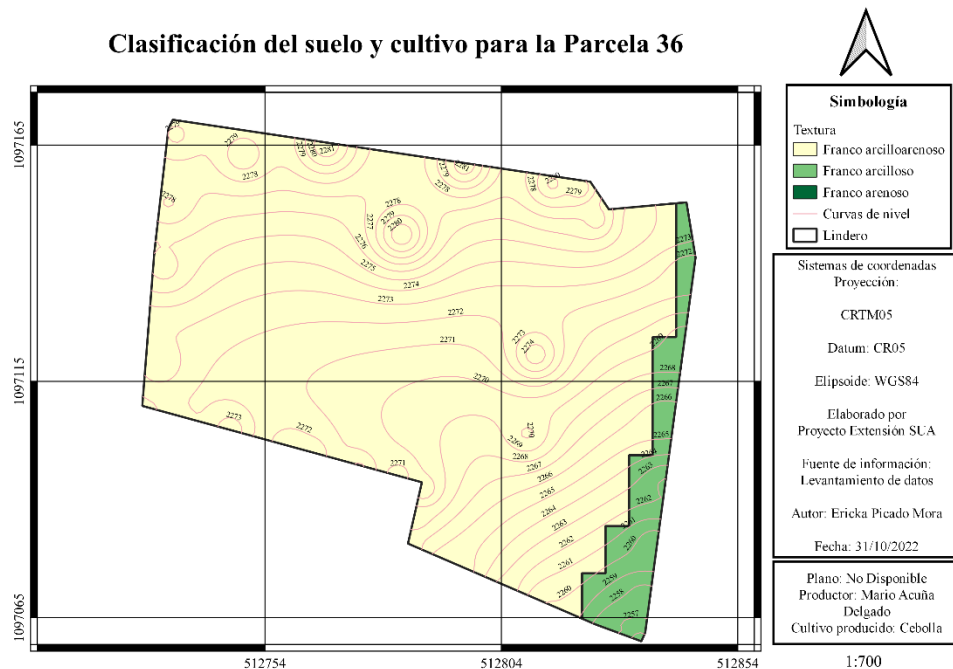


Figura 34. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 36.

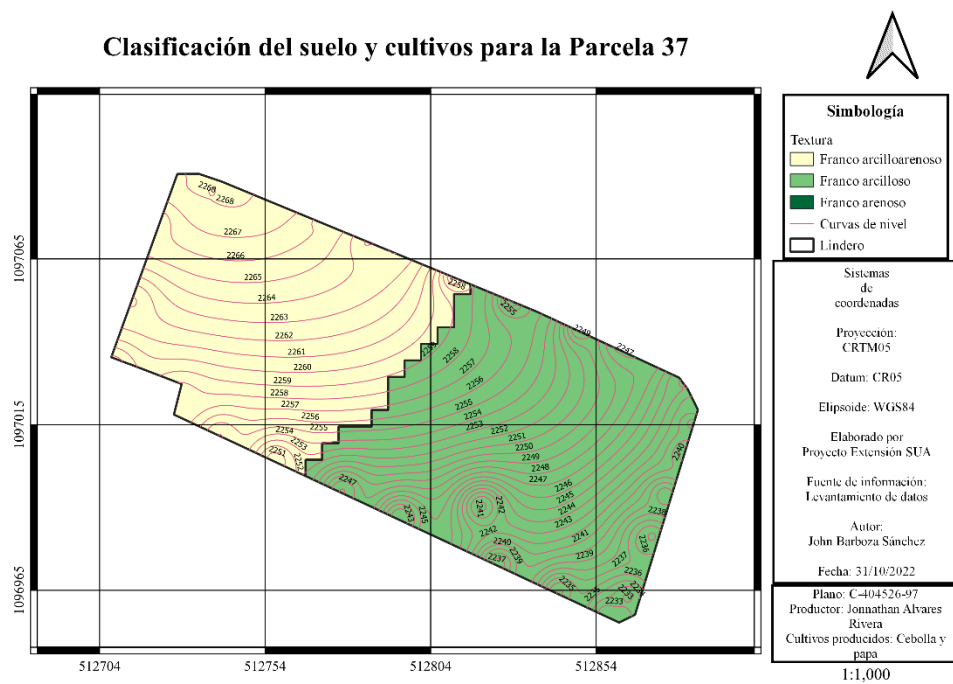


Figura 35. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 37.

Clasificación del suelo y cultivo para las Parcelas 38 y 39

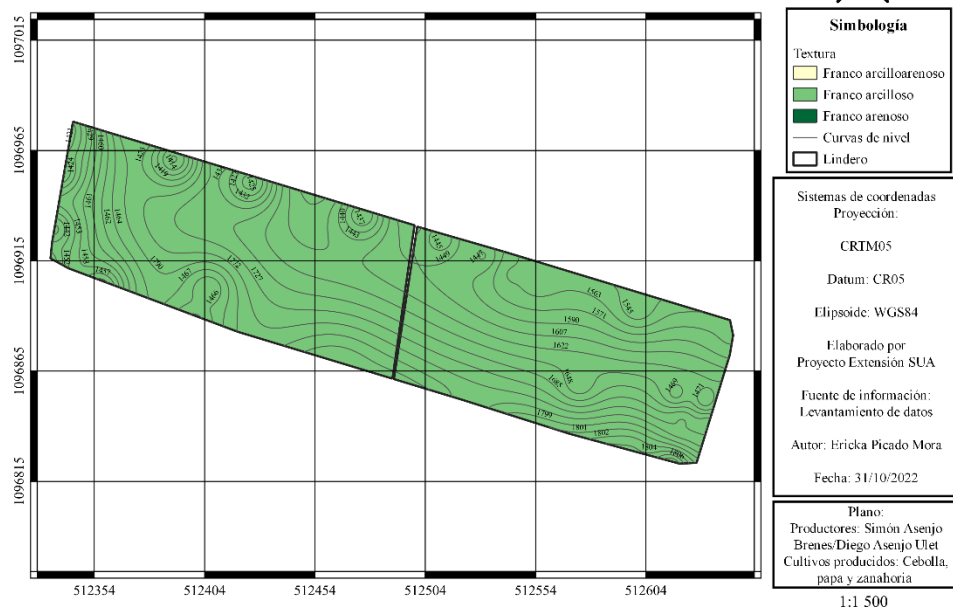


Figura 36. Clasificación del suelo y cultivo Parcelas 38 y 39.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 40

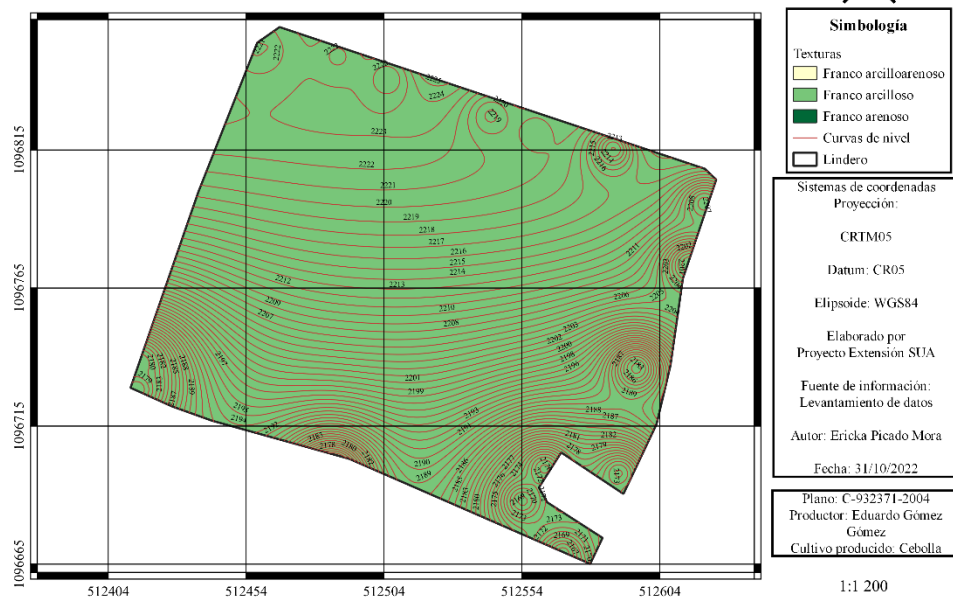


Figura 37. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 40.

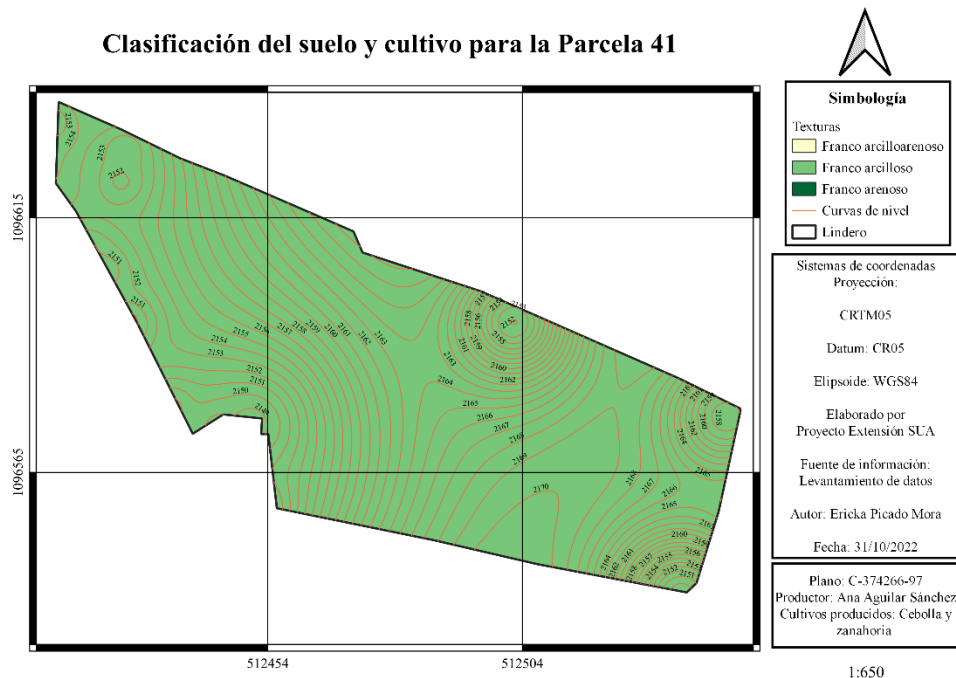


Figura 38. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 41.

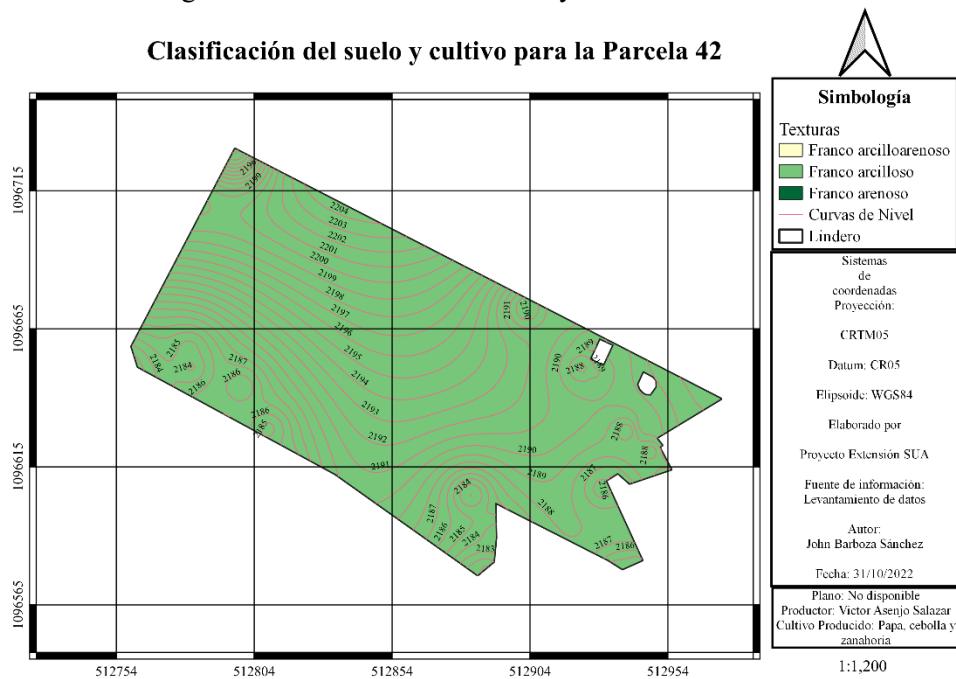


Figura 39. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 42.

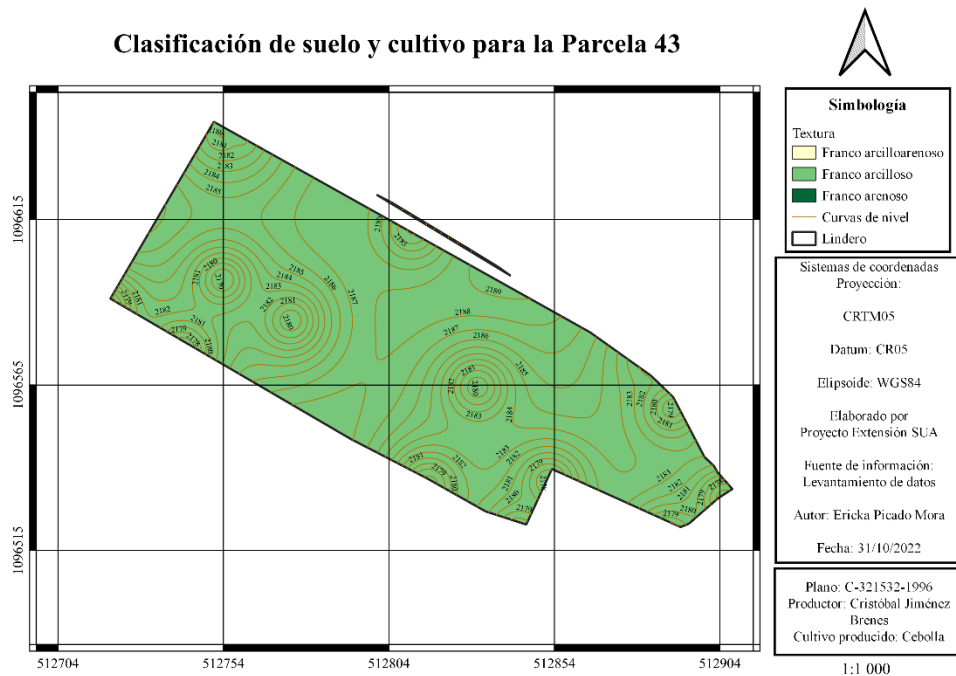


Figura 40. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 43.

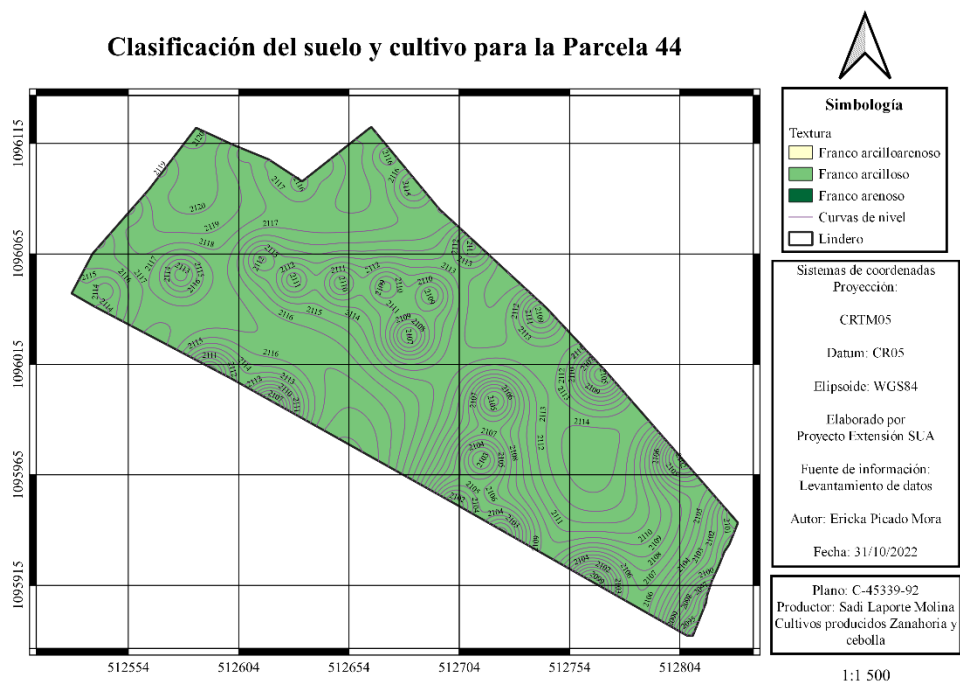


Figura 41. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 44.

1.4 Apéndice 5. Diseños de riego eficiente

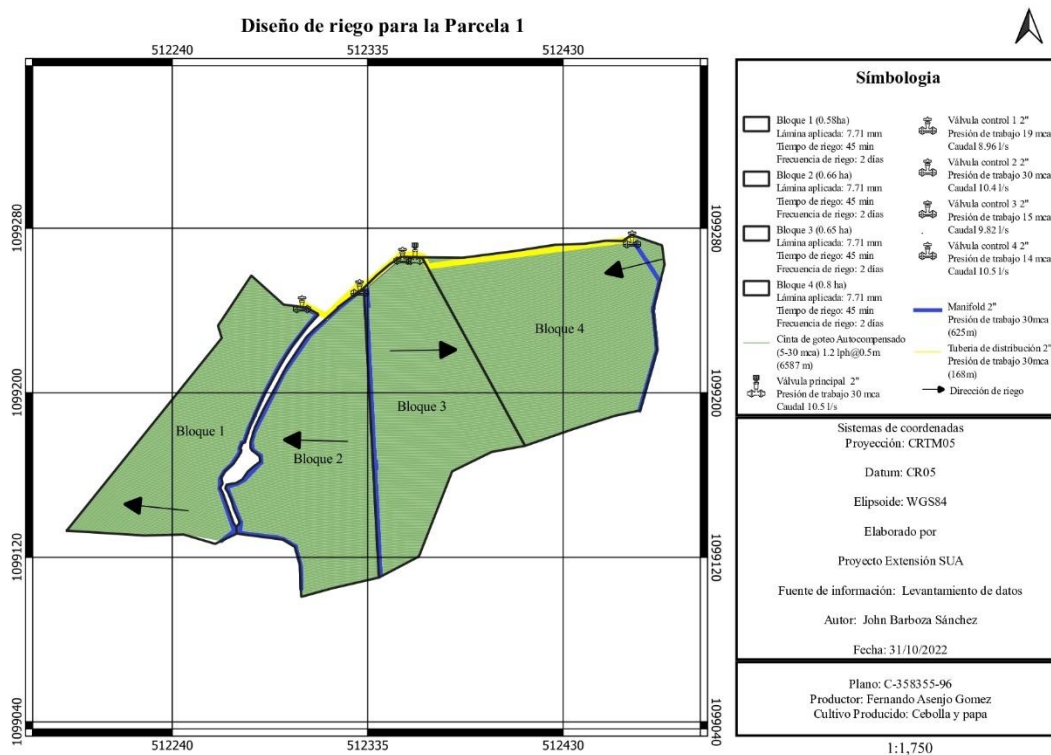


Figura 42. Diseño de riego por goteo Parcela 1.

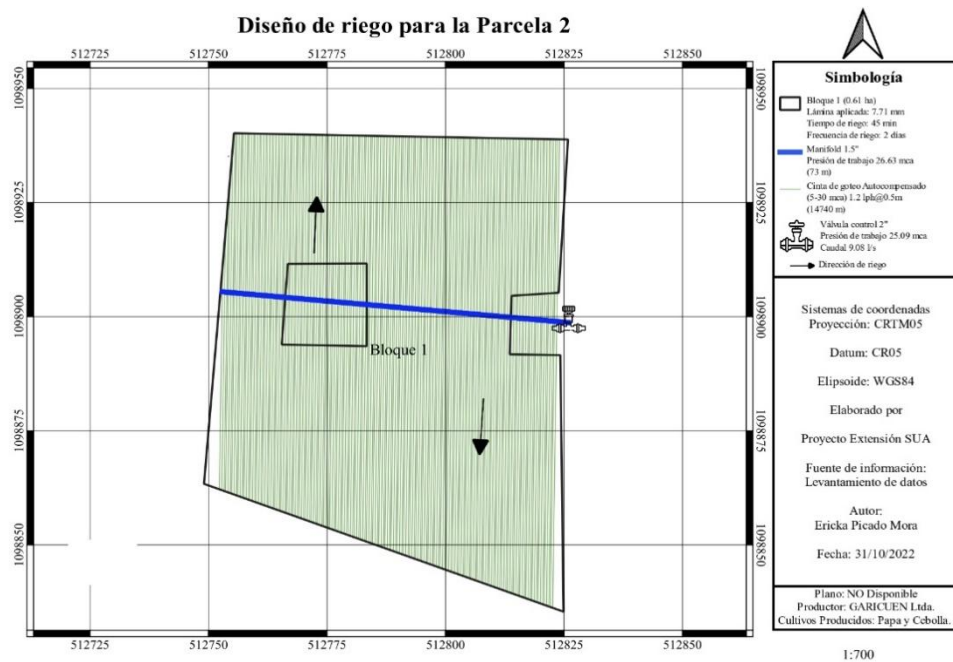


Figura 43. Diseño de riego por goteo Parcela 2.

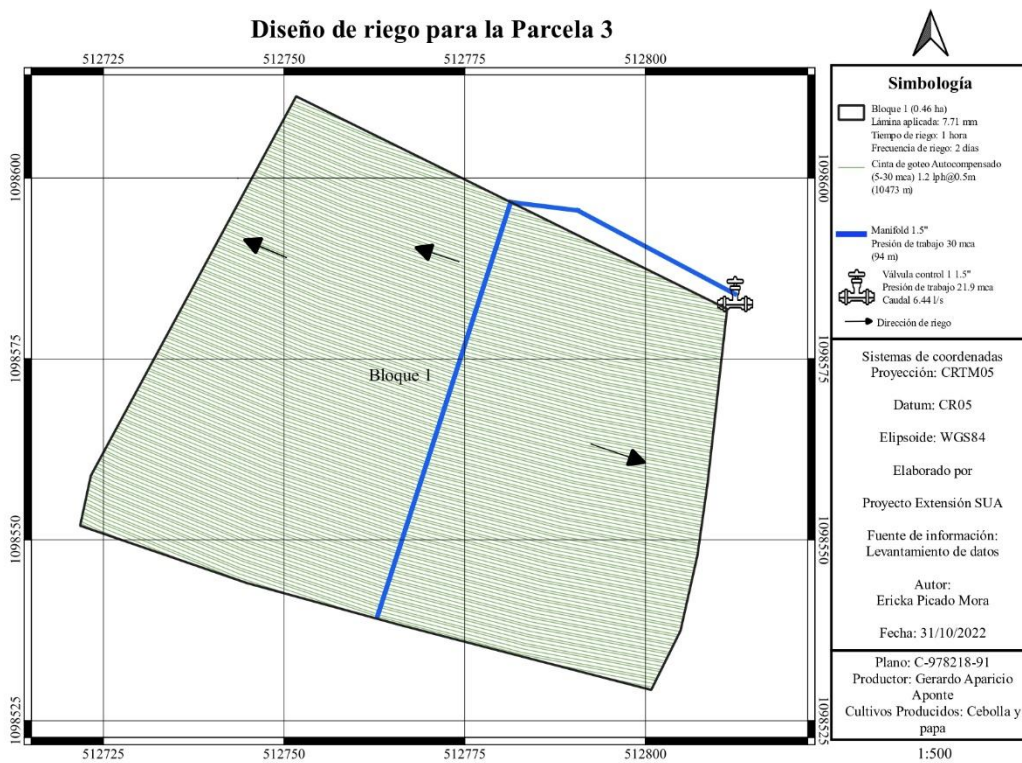


Figura 44. Diseño de riego por goteo Parcela 3.

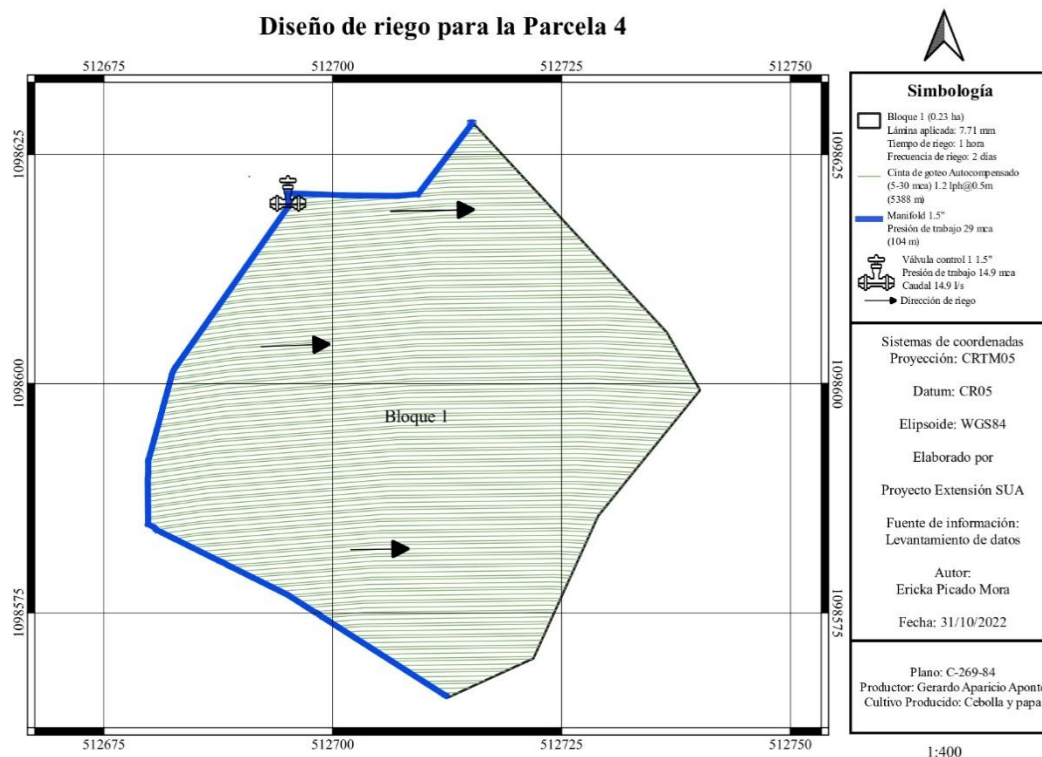


Figura 45. Diseño de riego por goteo Parcela 4.

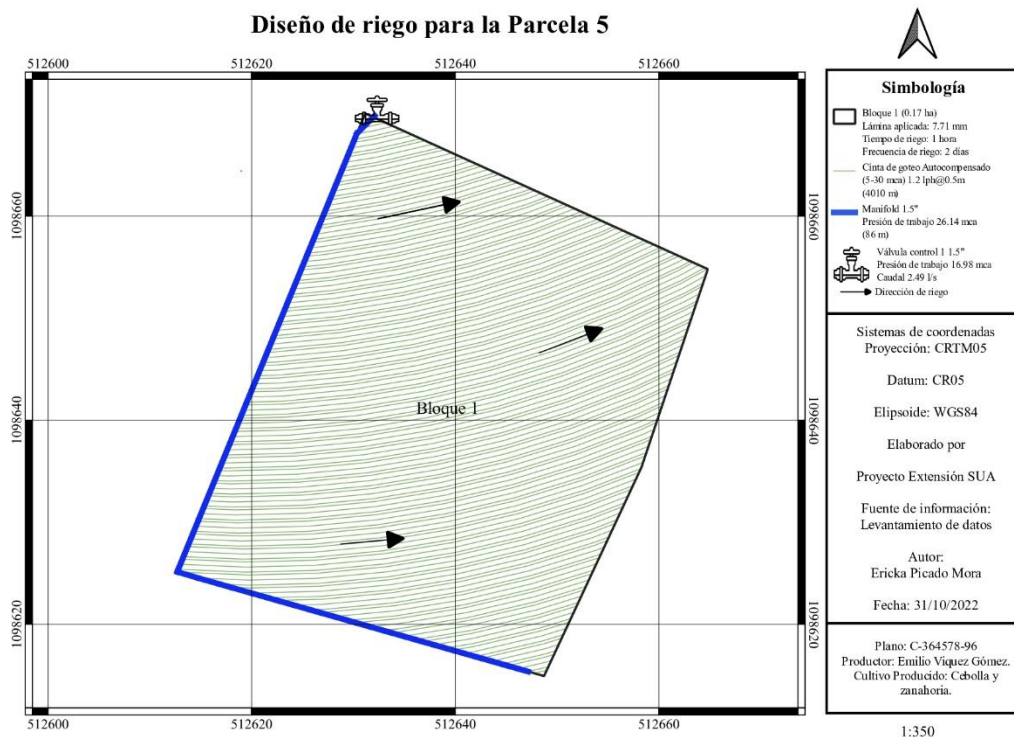


Figura 46. Diseño de riego por goteo Parcela 5.

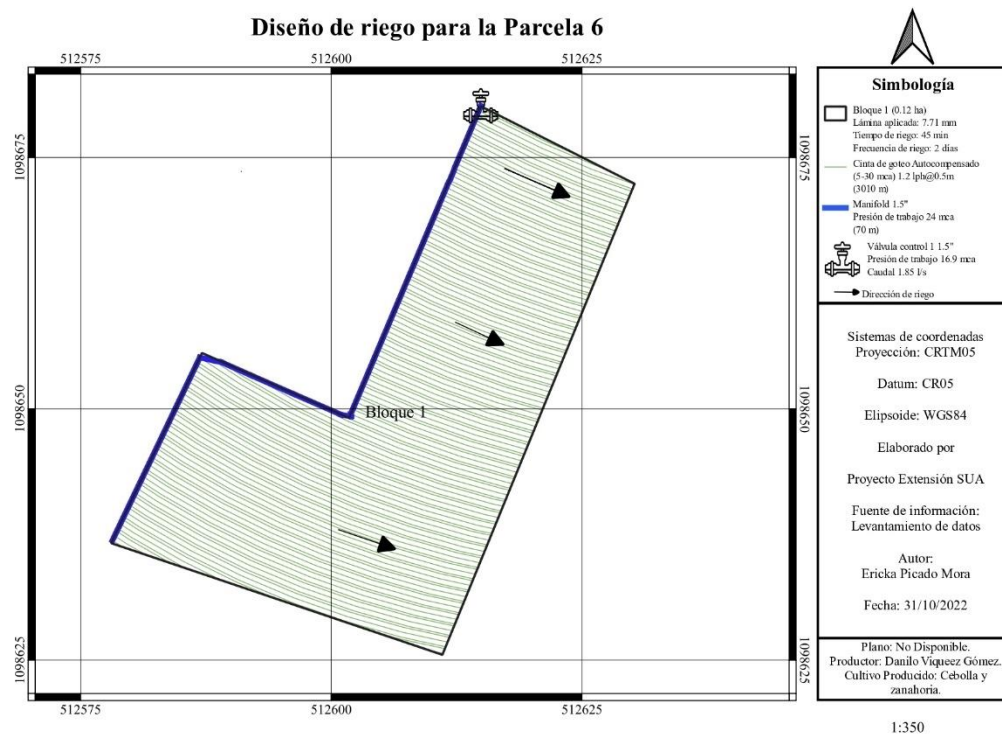


Figura 47. Diseño de riego por goteo Parcela 6.

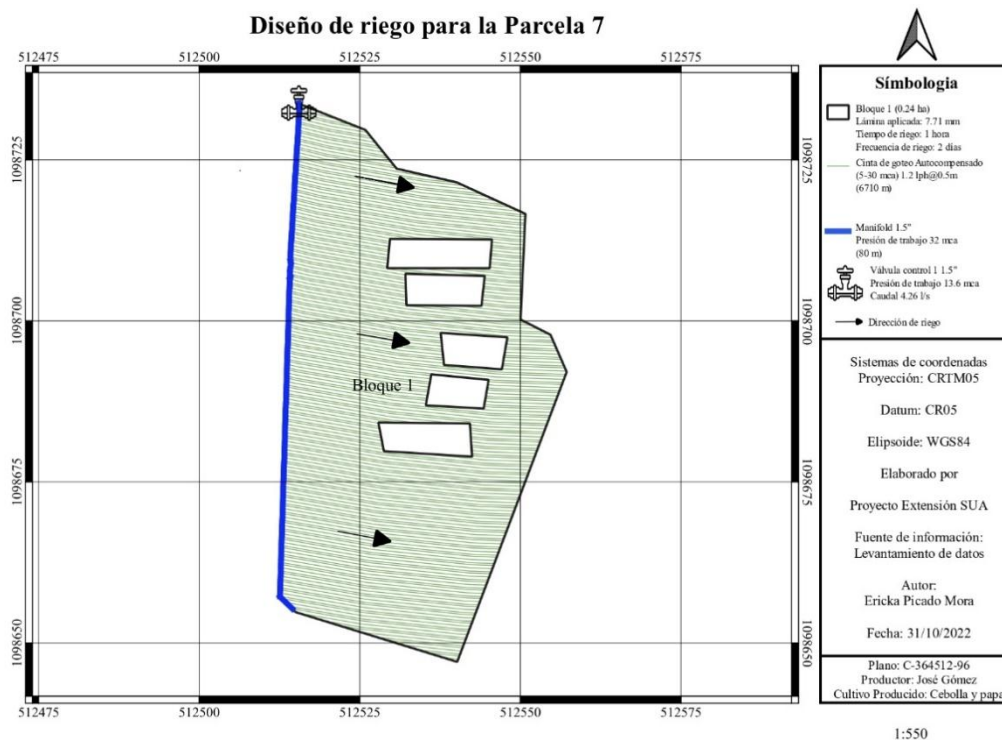


Figura 48. Diseño de riego por goteo Parcela 7.

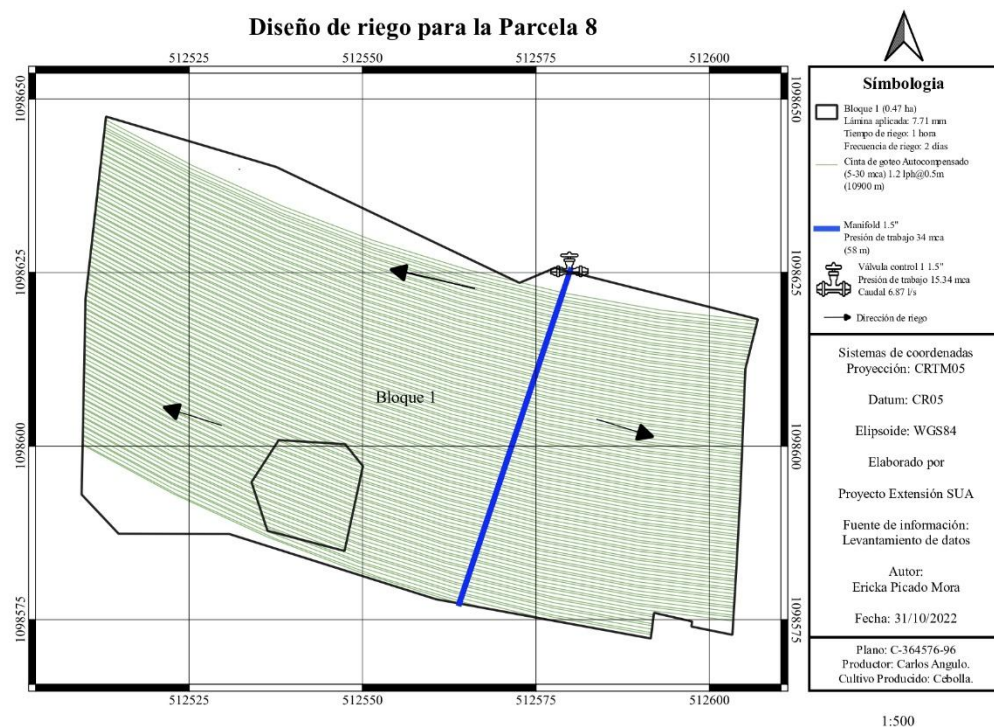


Figura 49. Diseño de riego por goteo Parcela 8.

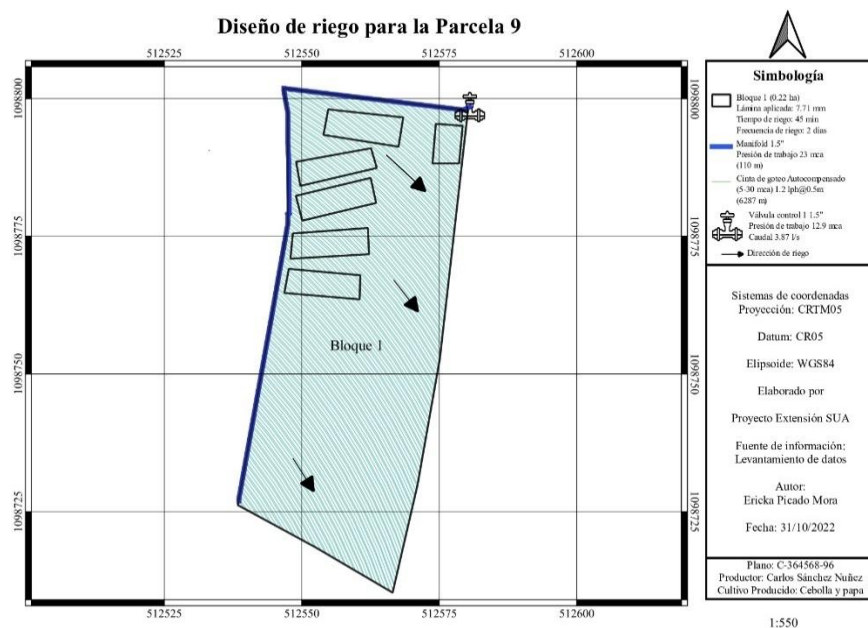


Figura 50. Diseño de riego por goteo Parcela 9.

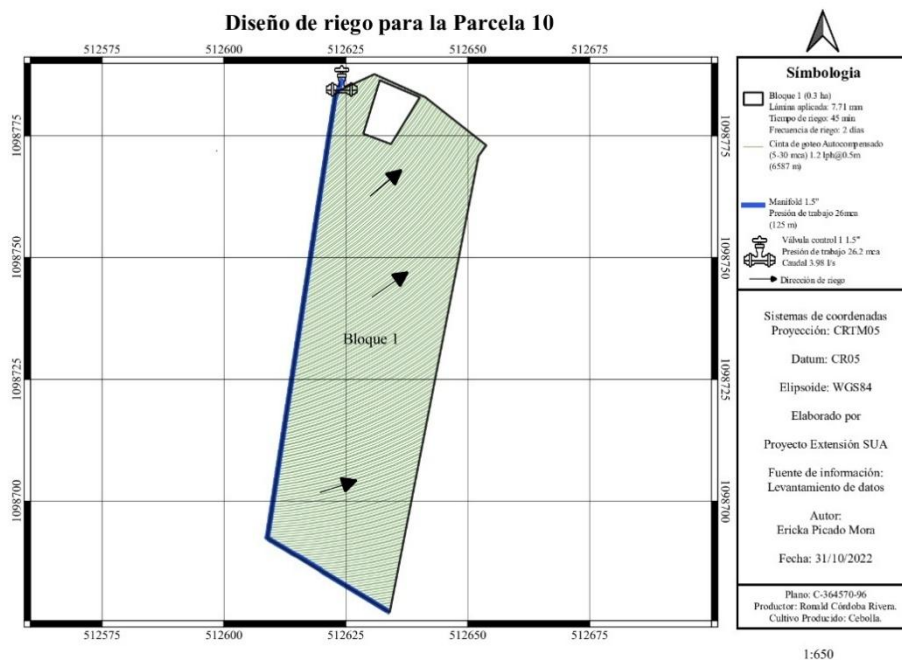


Figura 51. Diseño de riego por goteo Parcela 10.

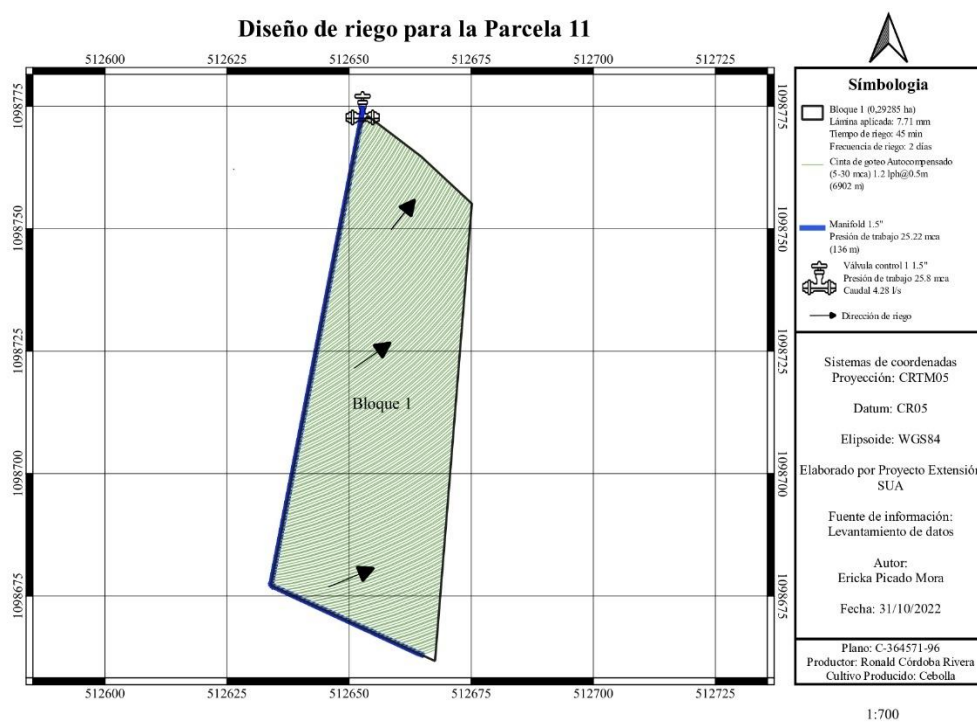


Figura 52. Diseño de riego por goteo Parcela 11.

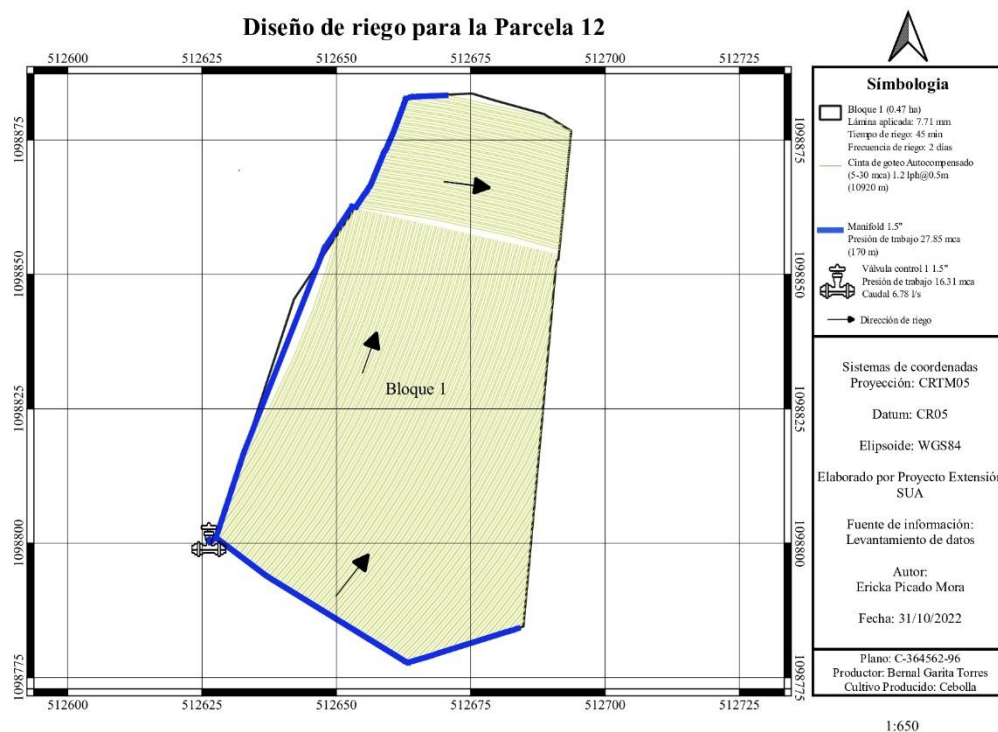


Figura 53. Diseño de riego por goteo Parcela 12.

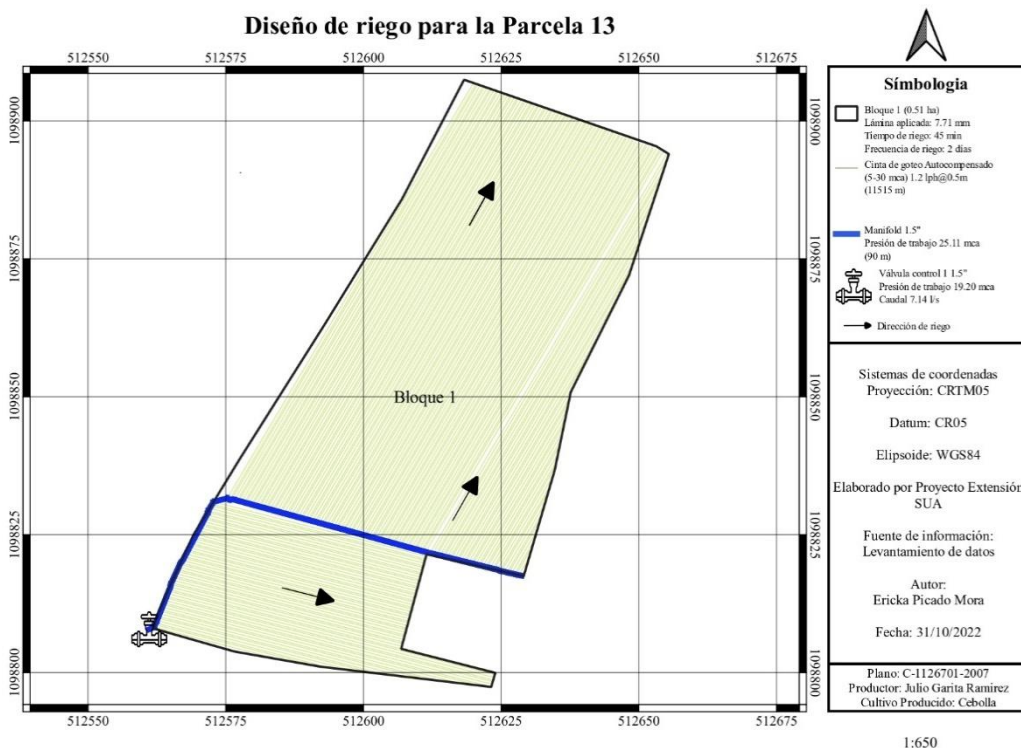


Figura 54. Diseño de riego por goteo Parcela 13.

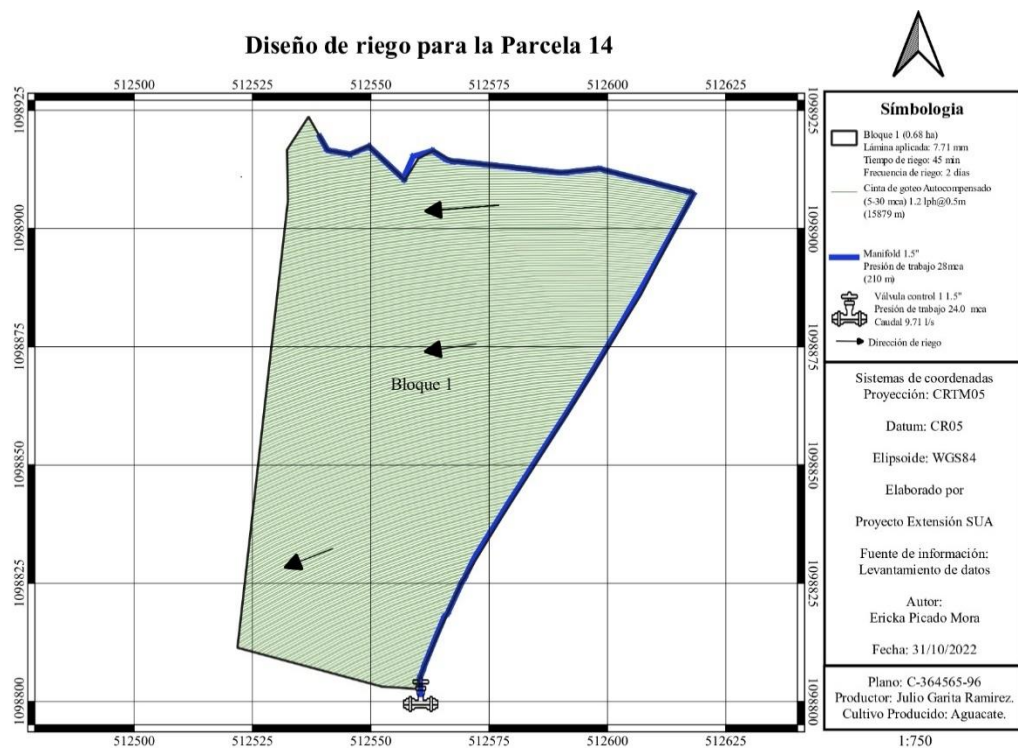


Figura 55. Diseño de riego por goteo Parcela 14.

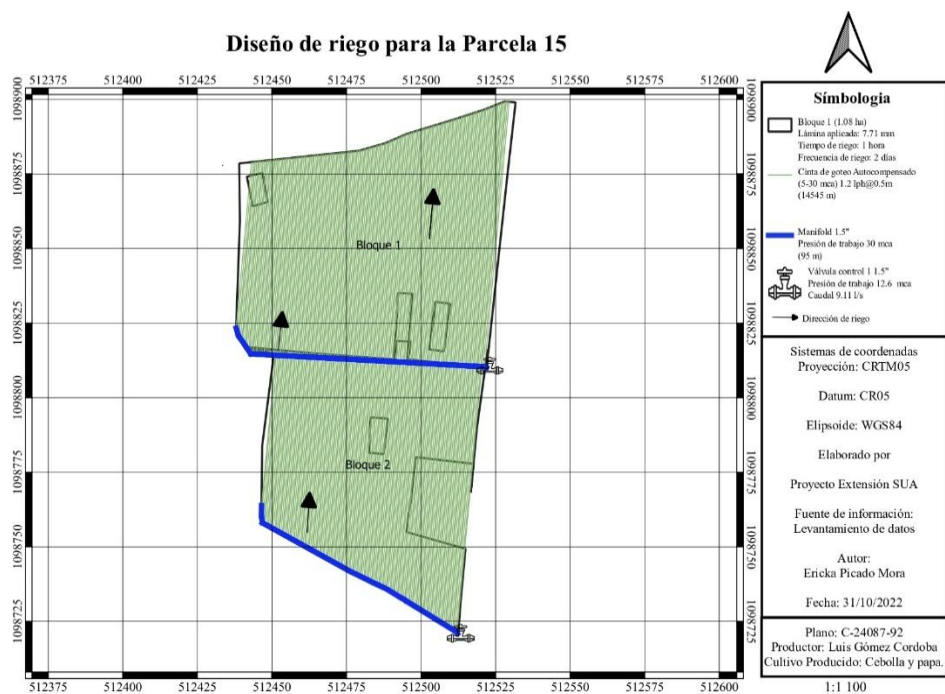


Figura 56. Diseño de riego por goteo Parcela 15.

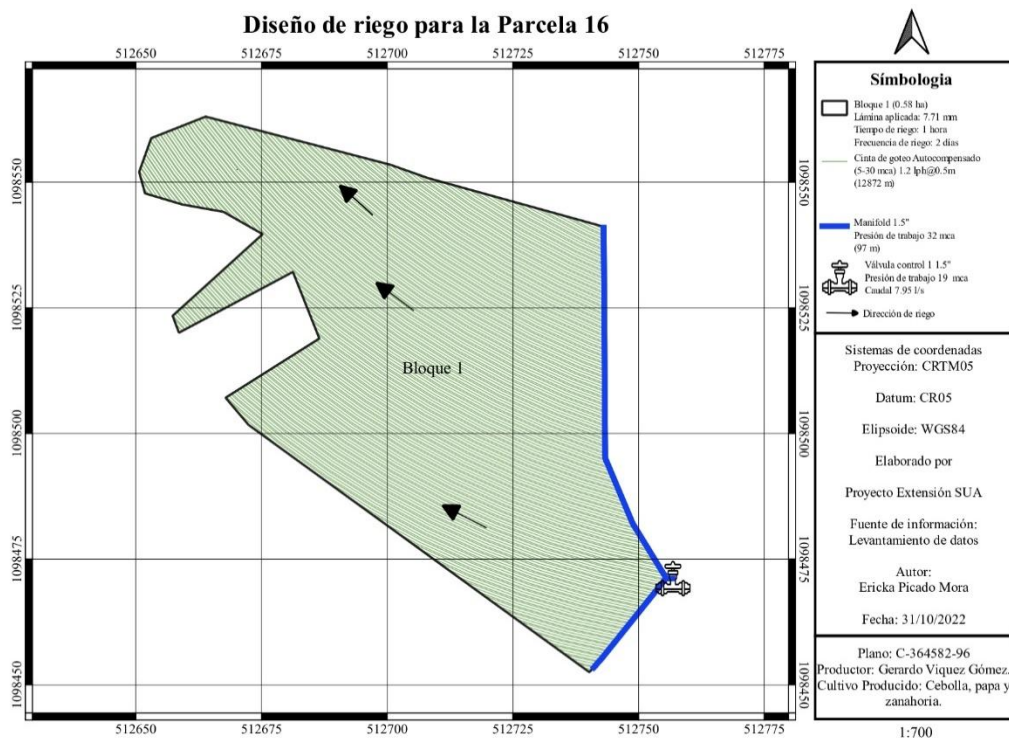


Figura 57. Diseño de riego por goteo Parcela 16.

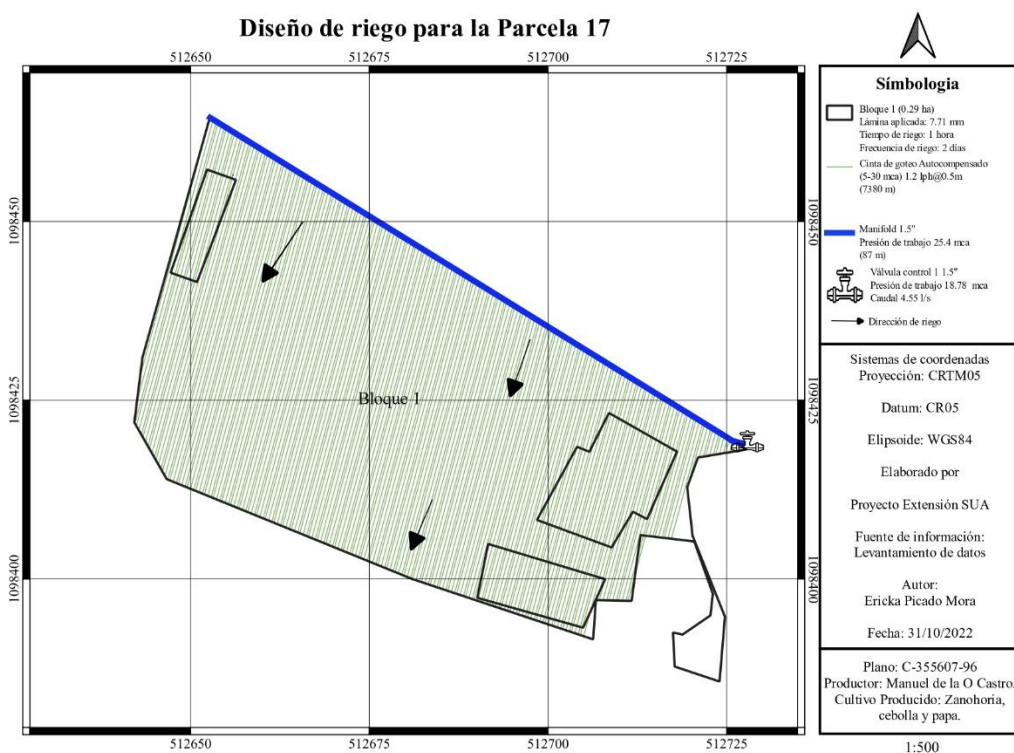


Figura 58. Diseño de riego por goteo Parcela 17.

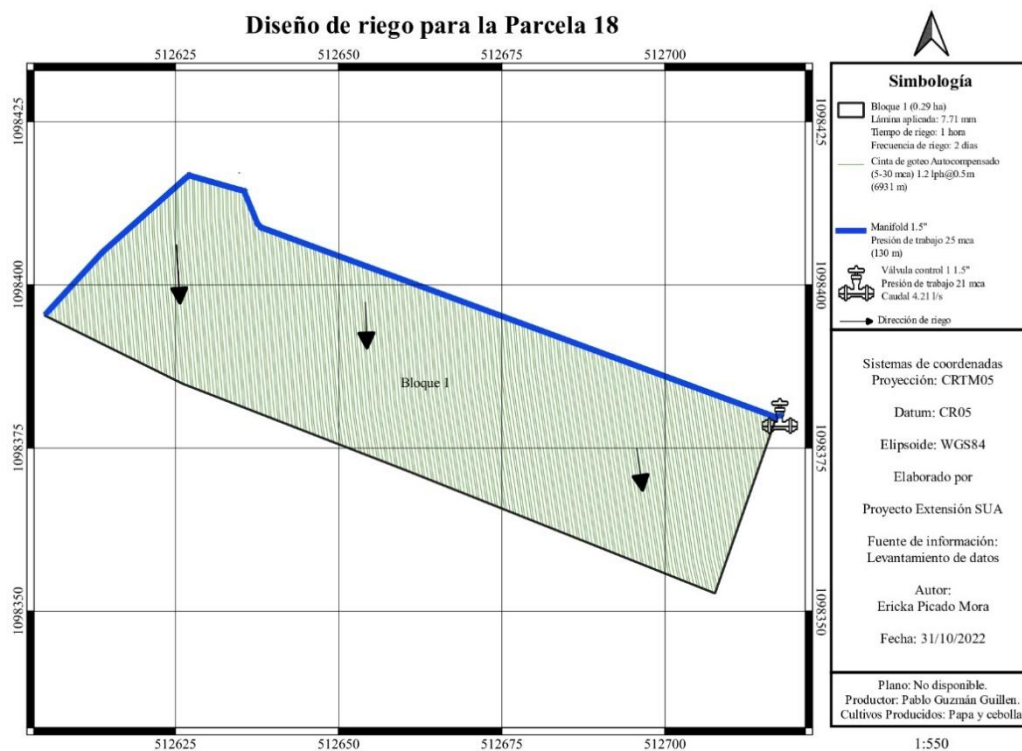


Figura 59. Diseño de riego por goteo Parcela 18.

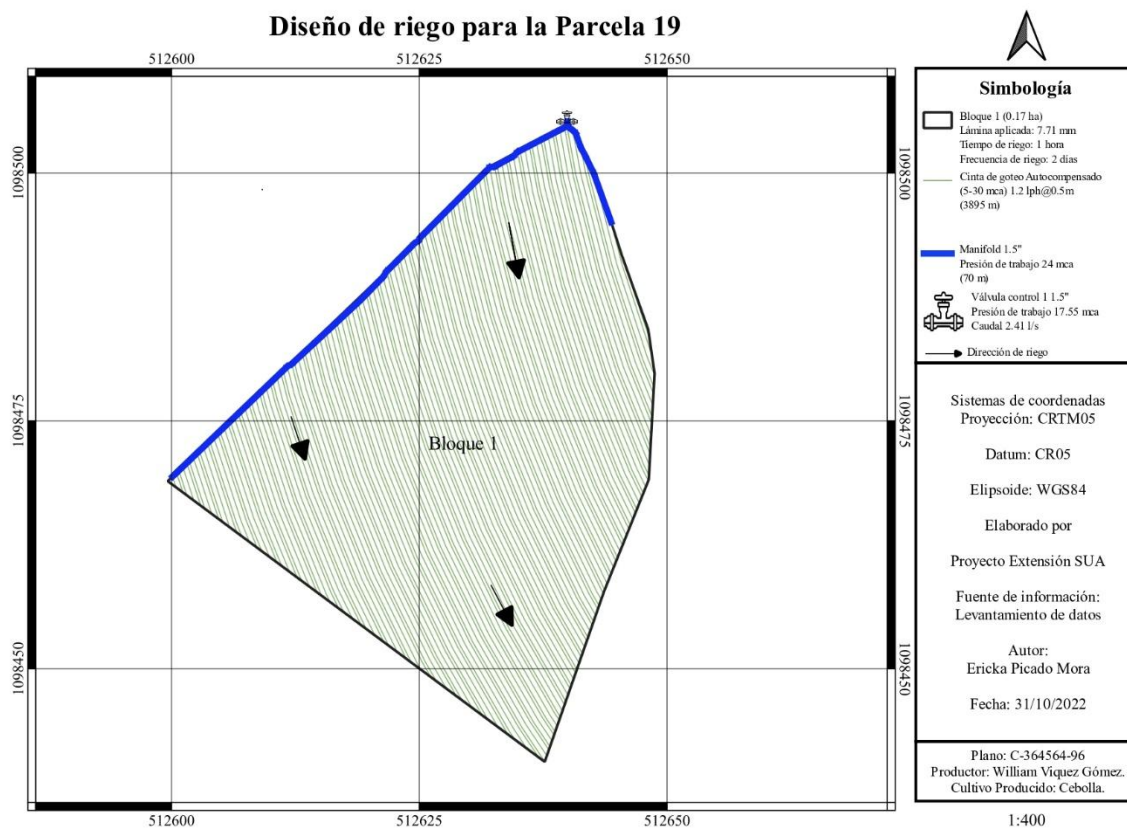


Figura 60. Diseño de riego por goteo Parcela 19.

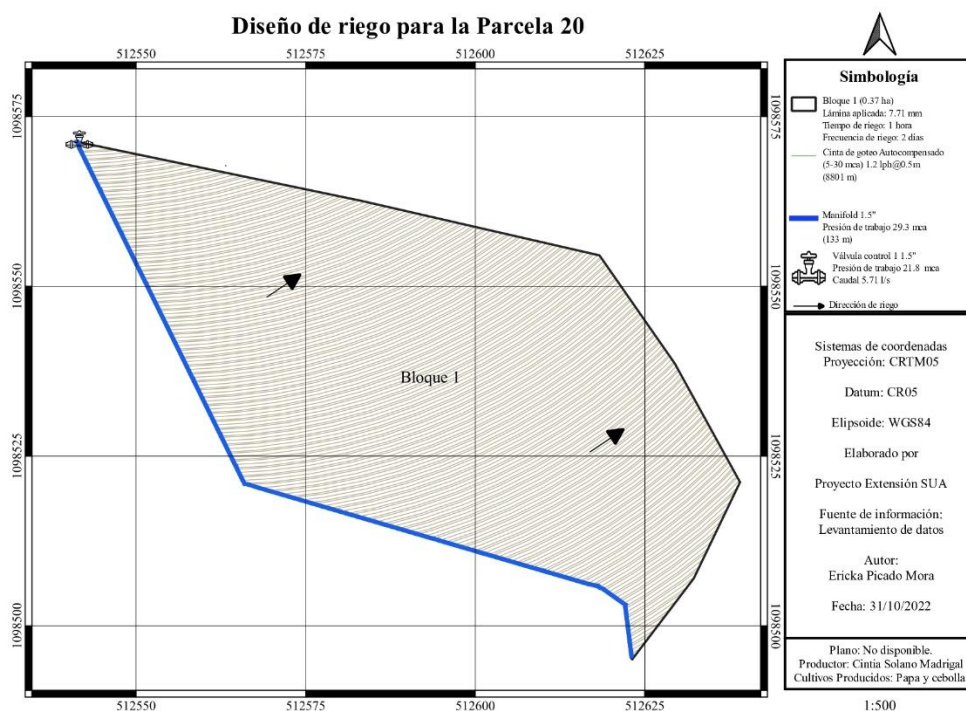


Figura 61. Diseño de riego por goteo Parcela 20.

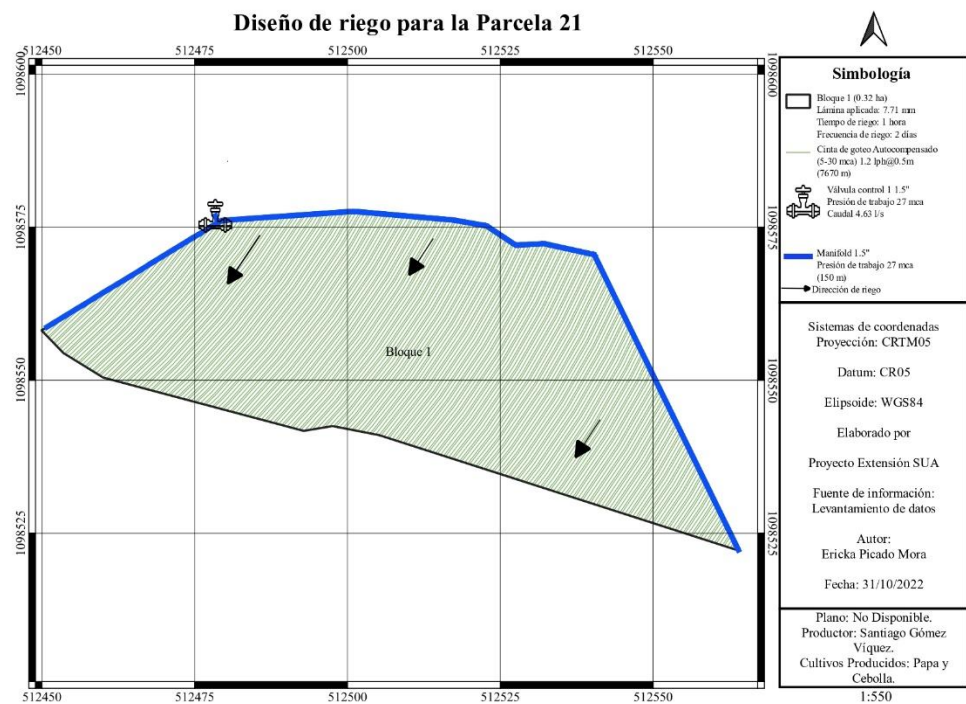


Figura 62. Diseño de riego por goteo Parcela 21.

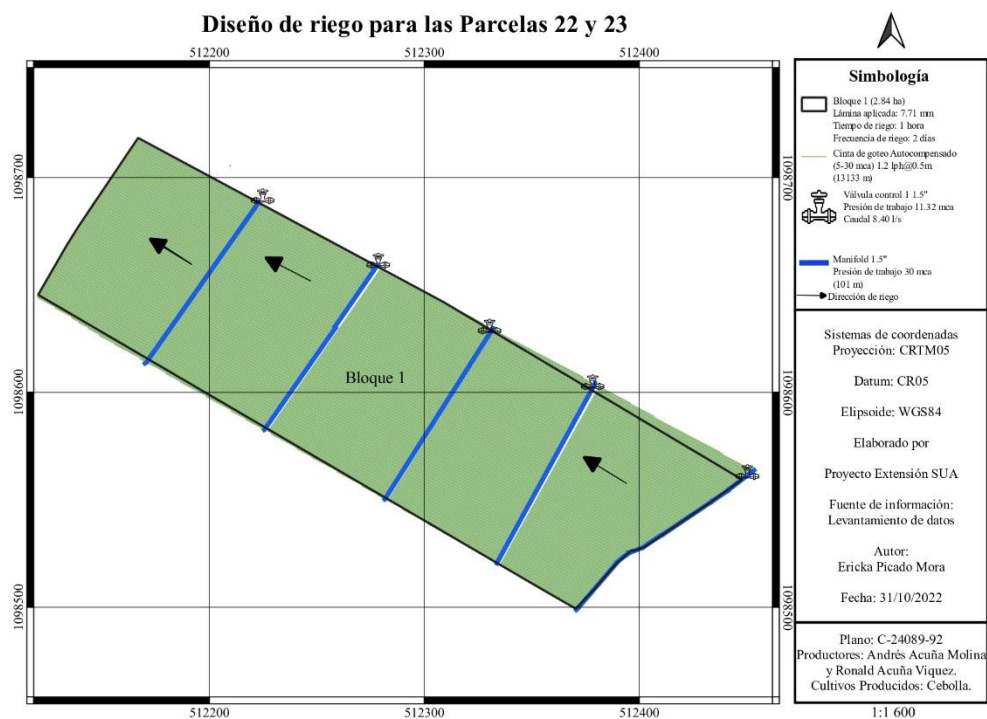


Figura 63. Diseño de riego por goteo Parcela 22 y 23.

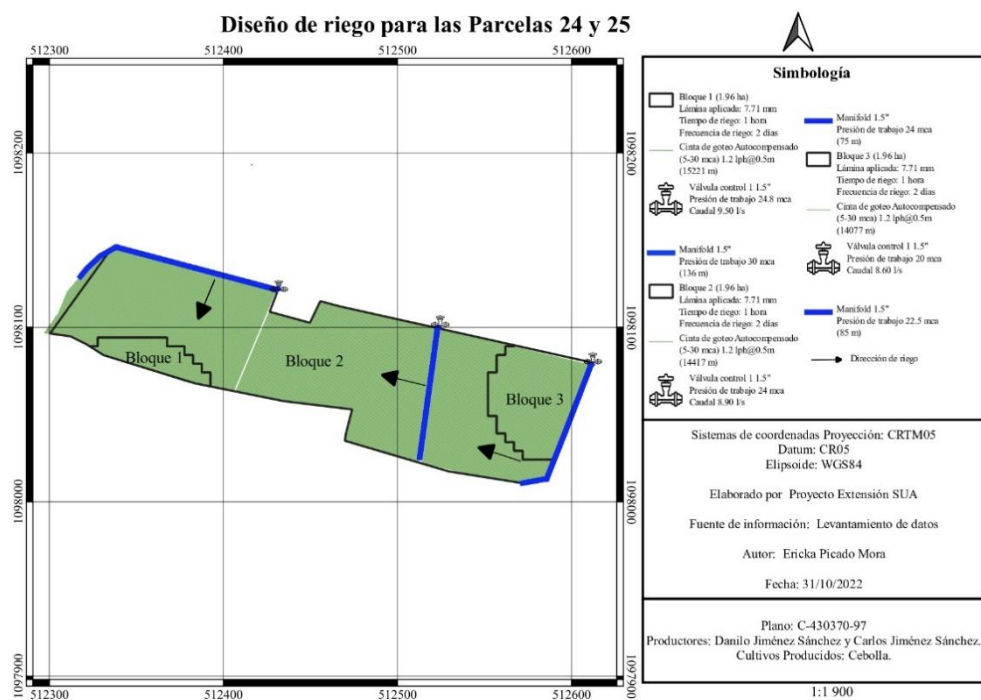


Figura 64. Diseño de riego por goteo Parcela 24 y 25.

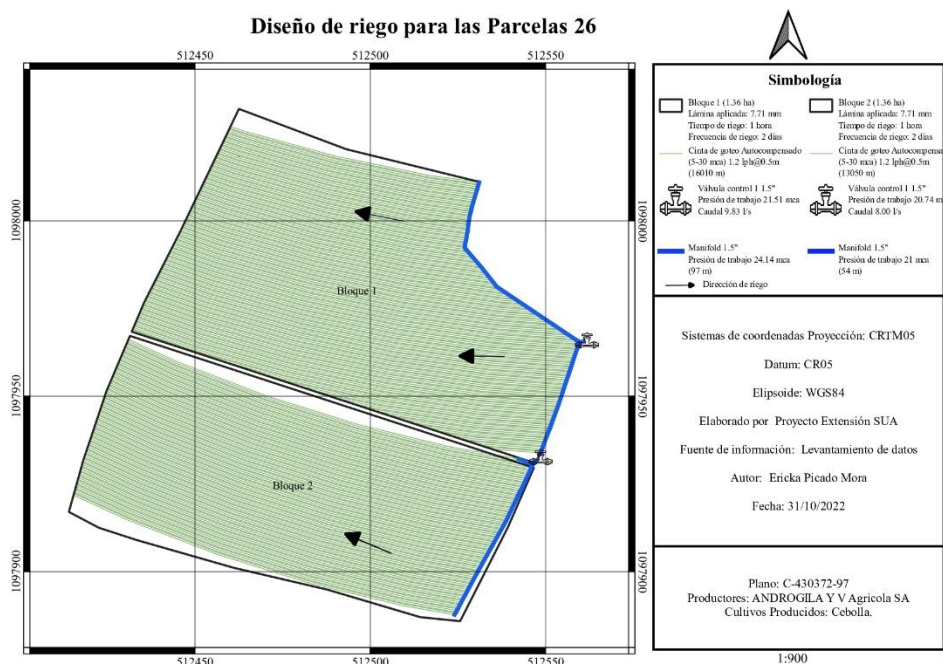


Figura 65. Diseño de riego por goteo Parcela 26.

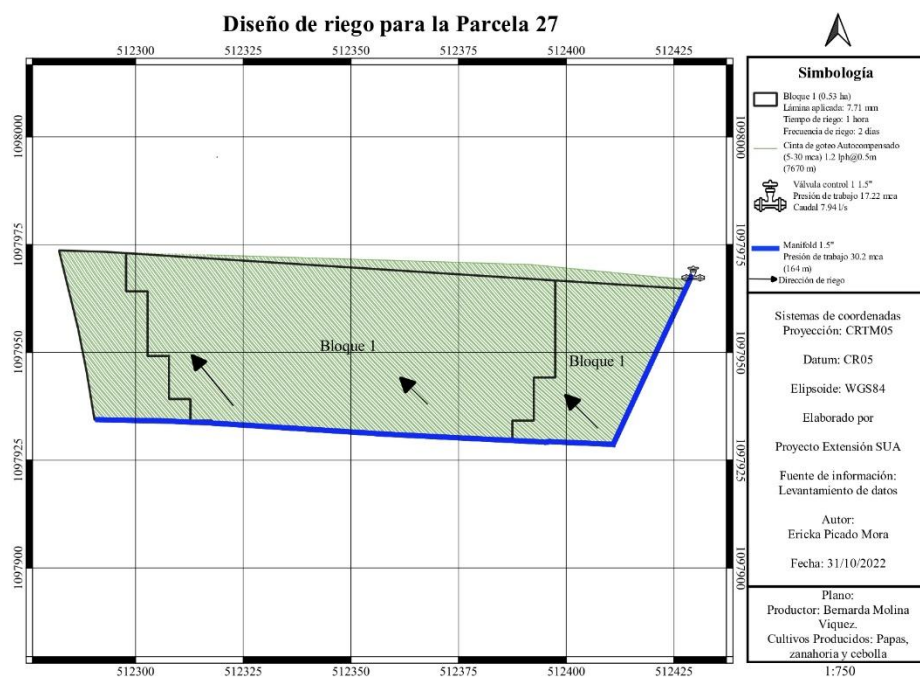


Figura 66. Diseño de riego por goteo Parcela 27.

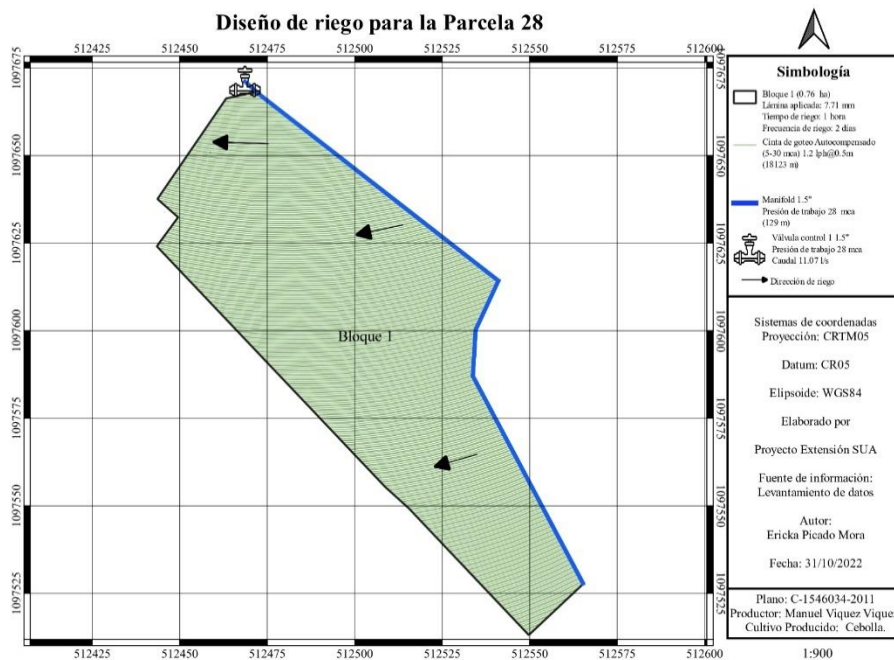


Figura 67. Diseño de riego por goteo Parcela 28.

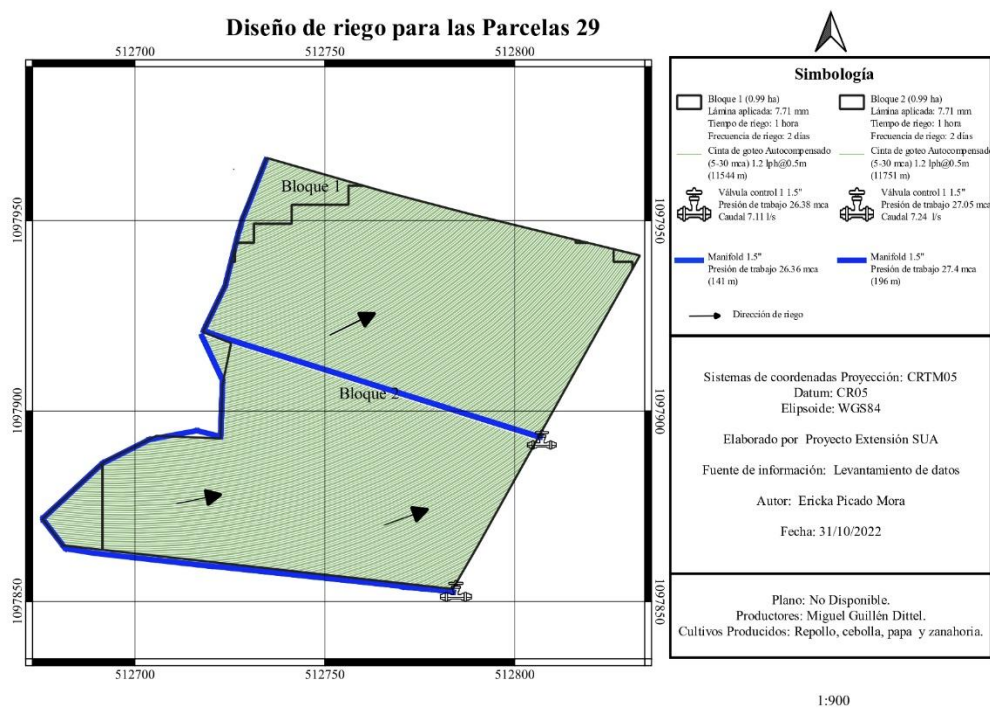


Figura 68. Diseño de riego por goteo Parcela 29.

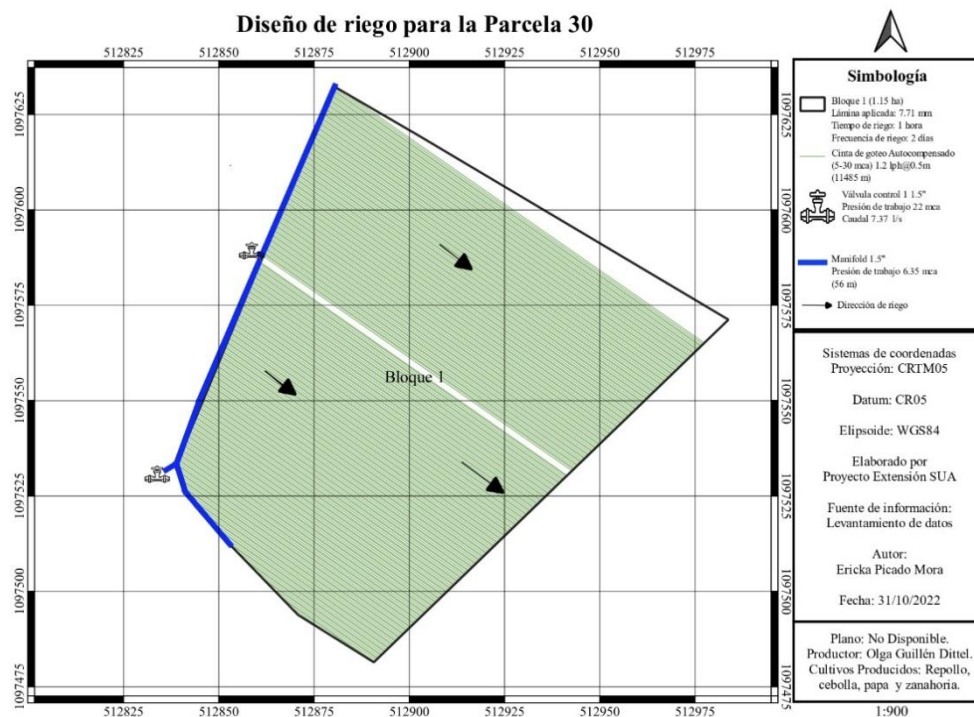


Figura 69. Diseño de riego por goteo Parcela 30.

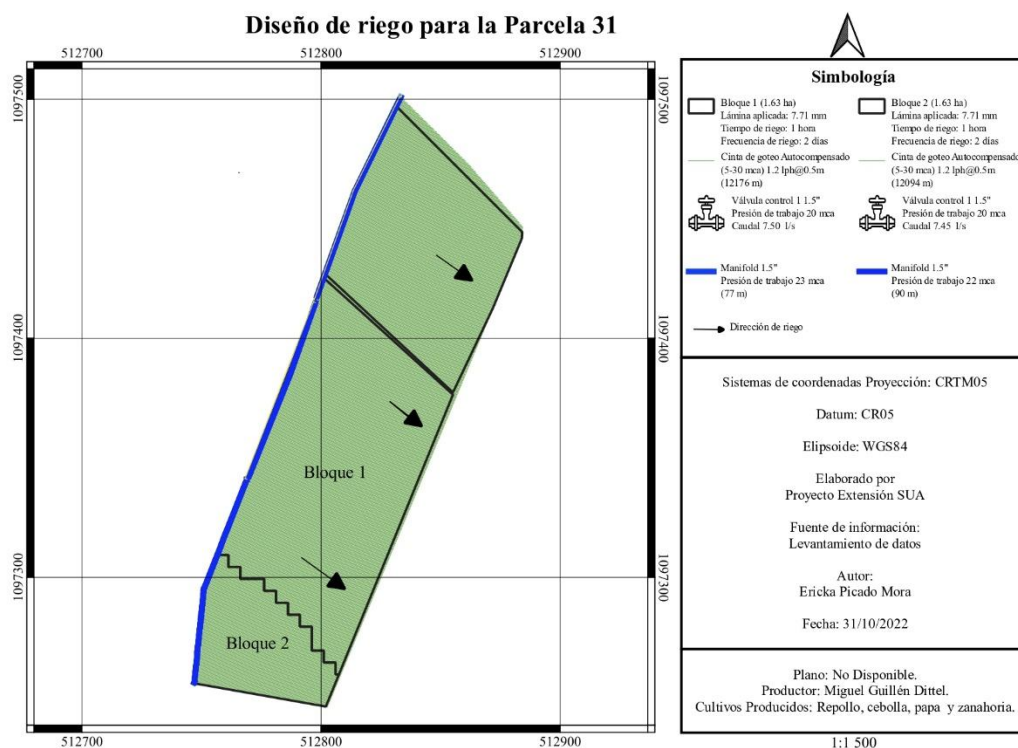


Figura 70. Diseño de riego por goteo Parcela 31.

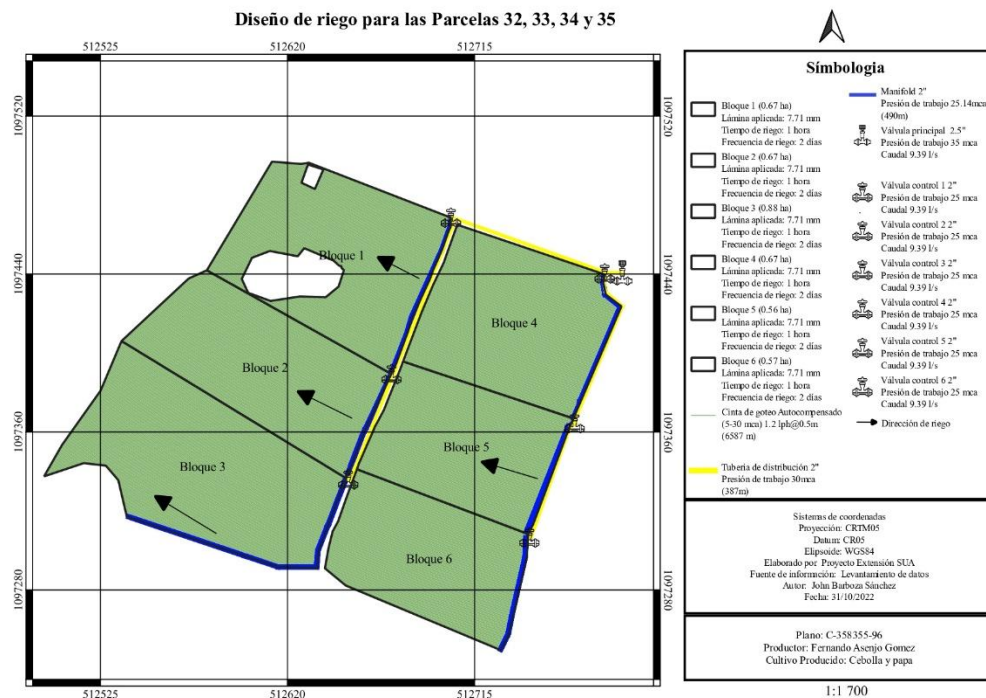


Figura 71. Diseño de riego por goteo Parcela 32, 33, 34 y 35.

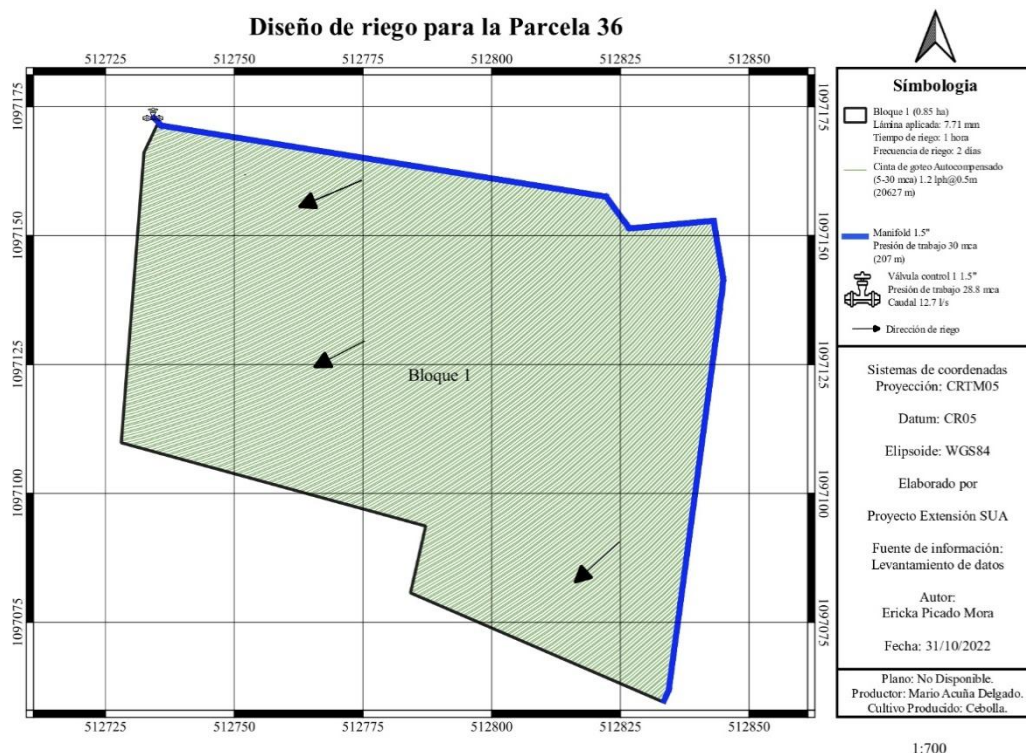


Figura 72. Diseño de riego por goteo Parcela 36.

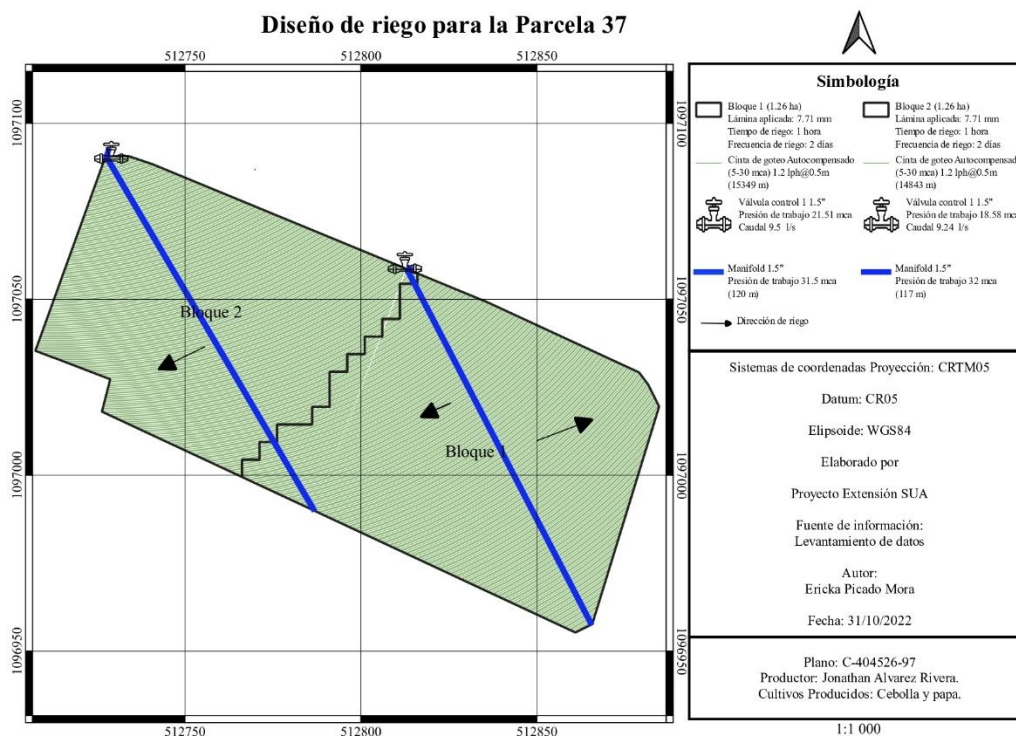


Figura 73. Diseño de riego por goteo Parcela 37.

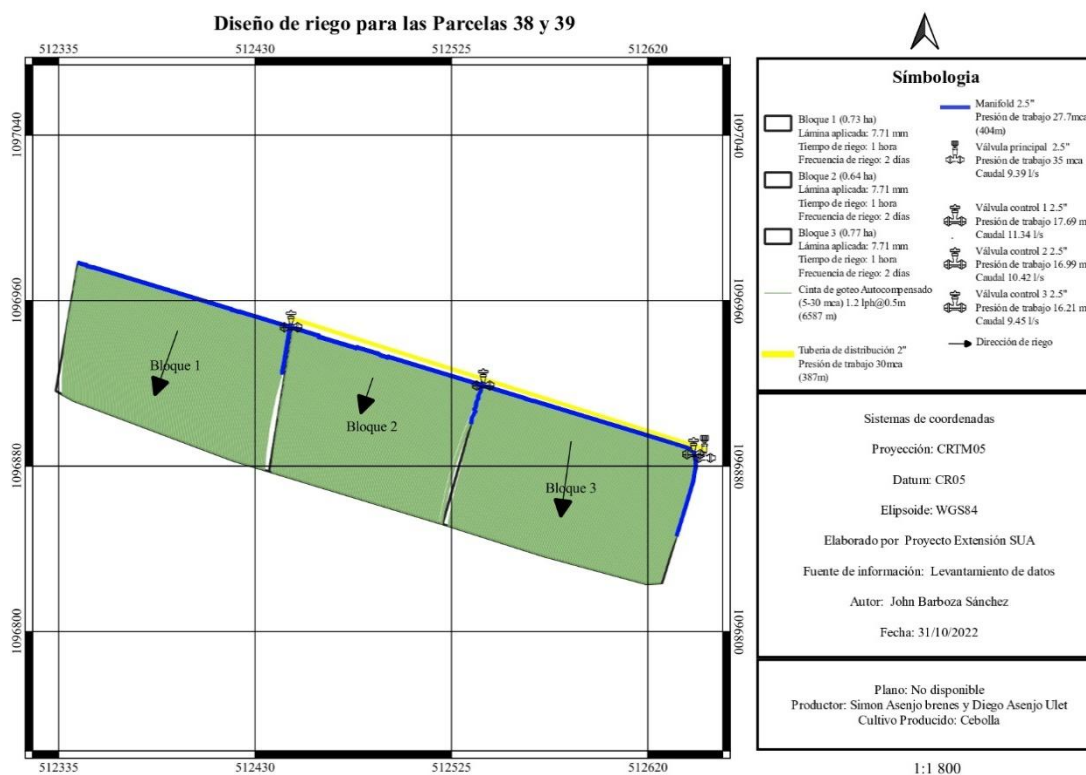


Figura 74. Diseño de riego por goteo Parcela 38 y 39.

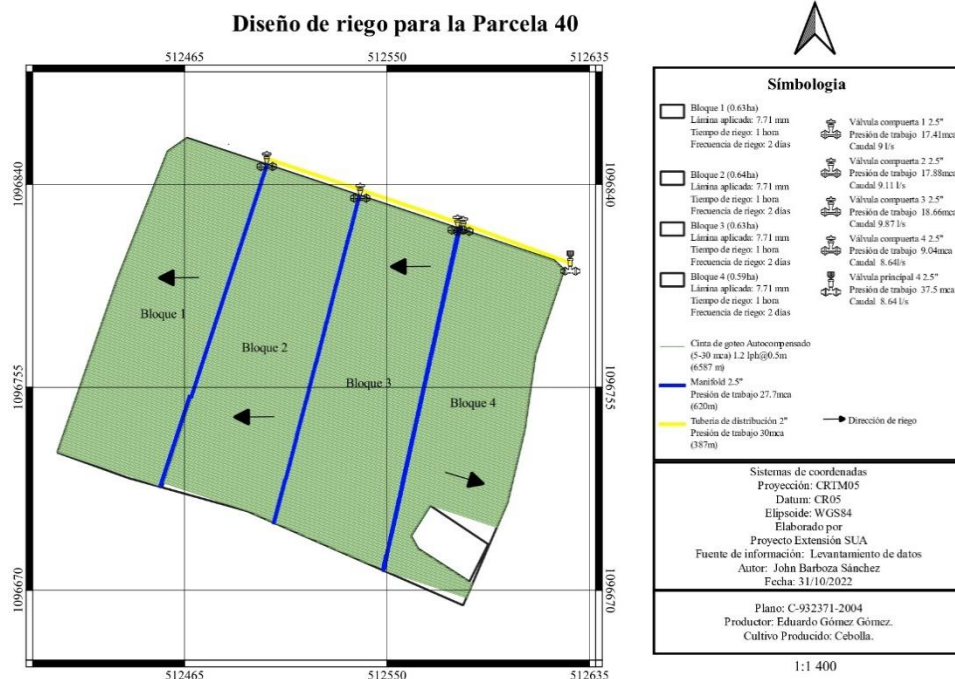


Figura 75. Diseño de riego por goteo Parcela 40.

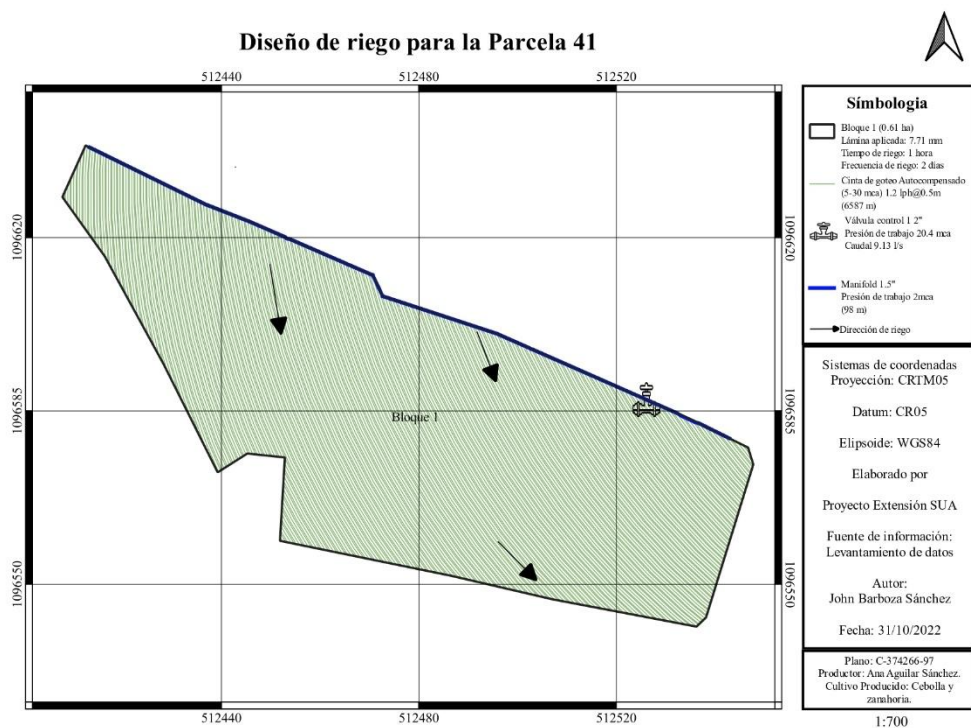


Figura 76. Diseño de riego por goteo Parcela 41.

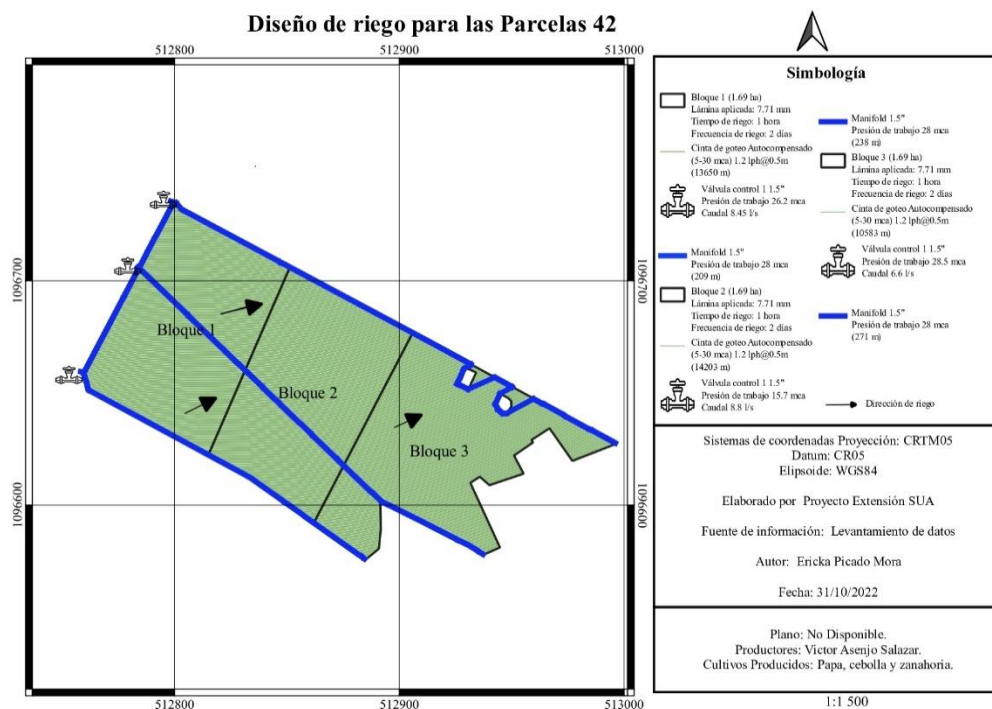


Figura 77. Diseño de riego por goteo Parcela 42.

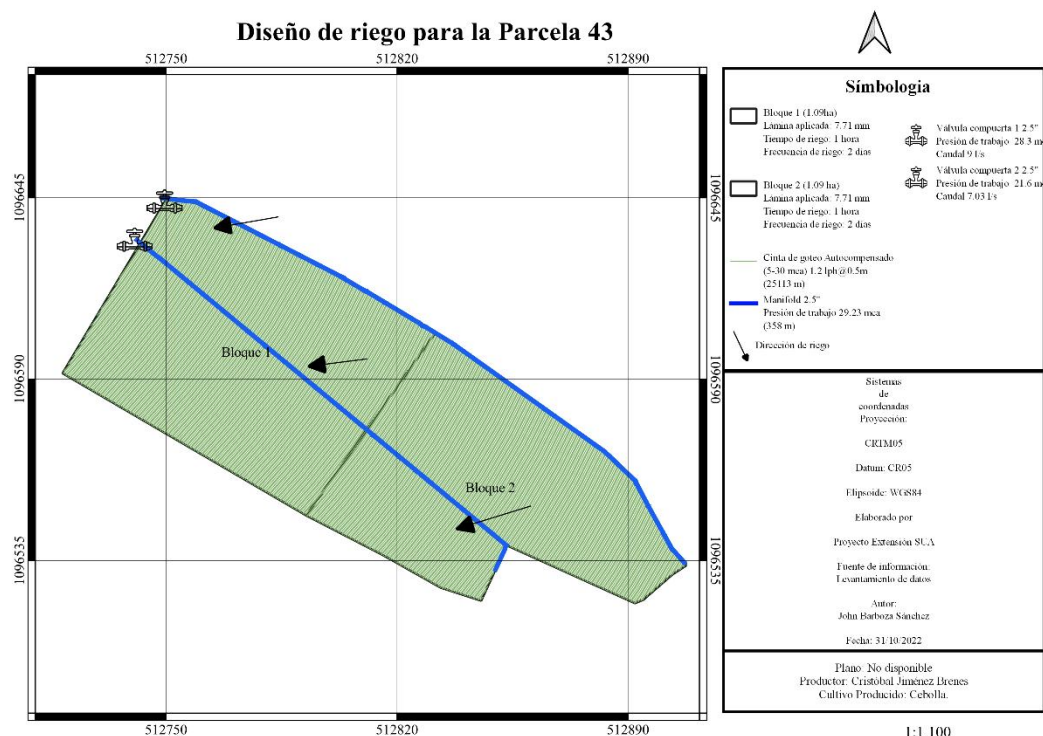


Figura 78. Diseño de riego por goteo Parcela 43.

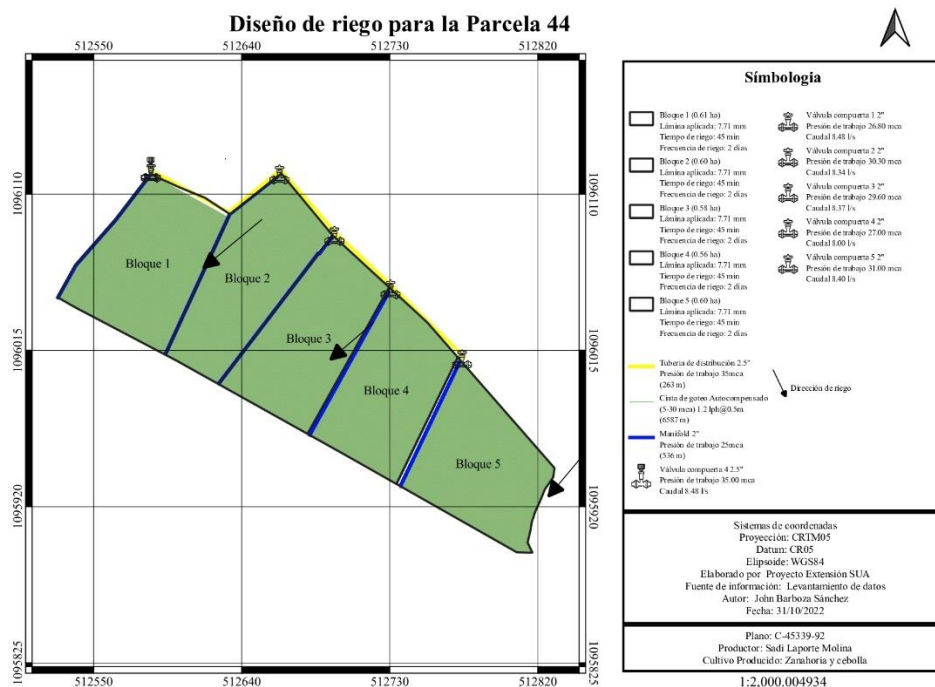


Figura 79. Diseño de riego por goteo Parcela 44.

1.5 Apéndice 6. Diseño de implementación de sistema de gestión

Cuadro AP6.1 Balance hídrico para cada unidad de manejo

Parcela	Área bruta (ha)	Área efectiva de riego (ha)	Agua útil a capacidad de campo (%)	Agua útil a punto de marchitez permanente (%)	Agotamiento permisible (%)	Lamina de riego a aplicar (mm)	Evapotranspiración de referencia (mm)	Frecuencia de riego (días)
1	2,7	2,16	18	8	40	8,09	3,67	2
10	0,28	0,224	18	8	40	8,09	3,67	2
11	0,29	0,232	18	8	20	7,38	3,51	2
12	0,47	0,376	18	8	40	8,09	3,67	2
13	0,51	0,408	18	8	20	7,38	3,51	2
14	0,68	0,544	18	8	20	5,98	2,84	2
15	1,08	0,864	18	8	20	7,38	3,51	2

16	0,58	0,464	18	8	80	8,09	3,75	2
17	0,29	0,232	18	8	60	8,09	3,72	2
18	0,29	0,232	18	8	40	8,09	3,67	2
19	0,17	0,136	18	8	20	7,38	3,51	2
2	0,61	0,488	18	8	20	7,38	3,51	2
20	0,37	0,296	18	8	40	8,09	3,67	2
21	0,32	0,256	18	8	60	8,09	3,72	2
22, 23	2,84	2,272	18	8	20	7,38	3,51	2
24, 25	1,96	1,568	18	8	20	7,38	3,51	2
26	1,36	1,088	18	8	20	7,38	3,51	2
27	0,53	0,424	18	8	60	8,09	3,72	2
28	0,76	0,608	18	8	20	7,38	3,51	2
29	0,99	0,792	18	8	80	8,09	3,66	2
3	0,46	0,368	18	8	40	8,09	3,67	2
30	1,15	0,92	18	8	80	8,09	3,66	2
31	1,63	1,304	18	8	80	8,09	3,66	2
32, 33, 34, 35	4,01	3,208	18	8	60	8,09	3,72	2
36	0,85	0,68	18	8	20	7,38	3,51	2
37	1,26	1,008	18	8	20	7,38	3,51	2
38, 39	2,14	1,712	18	8	20	7,38	3,51	2
4	0,23	0,184	18	8	40	8,09	3,67	2
40	2,53	2,024	18	8	20	7,38	3,51	2
41	0,61	0,488	18	8	20	7,38	3,51	2
42	1,69	1,352	18	8	40	8,09	3,82	2

43	1,09	0,872	18	8	40	7,38	3,51	2
44	2,95	2,36	18	8	60	8,00	3,70	2
5	0,17	0,136	18	8	60	8,09	3,72	2
6	0,12	0,096	18	8	40	8,00	3,65	2
7	0,24	0,192	18	8	20	7,38	3,51	2
8	0,47	0,376	18	8	60	8,09	3,73	2
9	0,22	0,176	18	8	20	7,38	3,51	2

1.6 Apéndice 7. Logros no contemplados en el proyecto

Desarrollo de sensor de medición de humedad de suelo y evapotranspiración



Figura 80. Sensor de humedad de suelo y evapotranspiración

1.7 Apéndice 8. Evidencias de giras y socialización de los resultados



Figura 81. Recolección de muestras de suelo



Figura 82. Recolección de muestras de suelo con estudiantes asistentes



Figura 83. Levantamiento del terreno en parcela de productor beneficiario con estudiantes asistentes



Figura 84. Entrega de material complementario a personal de la SUA

1.8 Apéndice 9. Participación de estudiantes con trabajos de grado y posgrado



PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN DEL RIEGO PARA OPTIMIZAR EL USO DE AGUA MEDIANTE SENSORAMIENTO EN LA SOCIEDAD DE USUARIOS DEL SANATORIO DURAN EN LA ZONA AL NORTE DE CARTAGO, COSTA RICA.

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Agrícola

Tutor: Kerin Fabian Romero Calvo

Alumna: Laura Alonso Martínez

- Resumen

La Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) en el proyecto Sanatorio Durán está formada por agricultores que cultivan principalmente papa, zanahoria, cebolla y fresa en suelos fértiles y bien drenados en la zona Norte de Cartago, Costa Rica. Con una extensión de 39,83 ha de cultivo para 42 unidades de manejo, los cultivos se benefician de estas condiciones óptimas para el uso eficiente del agua. Sin embargo, existe una oportunidad para mejorar la gestión del riego en esta área.

Desde el TEC, la Escuela de Ingeniería Agrícola y la colaboración y visión de la estudiante de intercambio Laura Alonso Martínez; se planea desarrollar una herramienta de gestión que integre información de cada unidad de manejo, es decir, especializada para cada agricultor, estableciendo modelos de riego específicos mediante riego de precisión para optimizar el uso del recurso hídrico y mejorar los rendimientos de los cultivos. Esta herramienta se implementará inicialmente en parcelas experimentales y posteriormente se integrará tecnológicamente en la Sociedad de Usuarios de Agua del proyecto Sanatorio Durán.

Debido a la actual escasez de agua y a una agricultura competitiva, surge la necesidad y el deseo de dotar a los pequeños productores con herramientas tecnológicas que estos puedan usar y comprender a diario. El proyecto comenzará con un sensor de humedad del suelo y temperatura ambiental; que recogerá los datos de evapotranspiración según el cultivo y la humedad ambiental, obtendremos una interfaz que traducirá los resultados a lámina húmeda del suelo, es decir, panel para el próximo riego. De esta manera se pretende aportar riego a la planta sólo cuando sea necesario, optimizando así el uso del agua y de los recursos hídricos.

Palabras clave

Riego, gestión, sensoramiento, humedad, temperatura, manejo de cultivos, agricultura, precipitaciones, recursos hidrológicos, hortícolas.

- 1- Antecedentes

Las características climáticas en las que nos encontramos son muy favorables para el cultivo de frutales y hortícolas. Con una lluvia anual nacional promedio de 3.300 mm, una temperatura media de 24°C, además de altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 3.820 metros sobre el nivel del mar y una posición en la zona tropical del globo, gracias a las características geológicas de Costa Rica, el país posee un considerable potencial de recursos hidrogeológicos (Segura *et al.* 2004).

Actualmente, debido a los eventos de variabilidad climática, se ha observado una variación en la frecuencia de las precipitaciones. Esto ha producido un descenso en la cantidad de lluvias y por lo tanto en el caudal. También se debe mencionar el aumento de la población y el crecimiento urbano, lo que contribuye a generar una mayor demanda de agua potable y a su vez contaminación de aguas superficiales y aguas subterráneas. Paralelamente esto ocasiona un aumento de la escorrentía superficial, lo que deriva en pérdida de suelo fértil y acuíferos.

La disminución de las lluvias afecta la agricultura y aumenta la necesidad de riego, especialmente con vientos persistentes, que son los habituales en la zona. La erosión del suelo es un problema tanto en épocas secas como lluviosas, debido a la relación entre la lluvia y la velocidad del viento. La erosión se agrava por las prácticas agrícolas de laboreo superficial, ya que dejan el suelo expuesto y la falta de barreras contra el viento.

La Sociedad de Usuarios de Agua en el proyecto Sanatorio Durán (Cartago) se encuentra en la cuenca hidrográfica del río Reventazón. Esta desemboca en el Caribe Norte de Costa Rica y cuenta con una superficie de 2.818,85 km², las principales actividades que se llevan a cabo son la ganadería lechera y la agricultura; el cultivo de pastos, hortícolas como papa o zanahoria y enormes plantaciones de banano para la exportación. El área de Cartago cuenta con una superficie de 219 km² y una altitud máxima de 3460 m.s.n.m. y una orografía muy irregular. (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, s. f.).

Los acuíferos de Cartago disponen de un caudal de 1 a 15 l/s y un espesor de 65 m. El tipo de suelo del área en la que se va a llevar a cabo el proyecto corresponde a inceptisol, es decir, es un suelo muy joven cuyo origen está en la meteorización (descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre) que sufren los sedimentos aluviales (suelos con perfil poco desarrollado formados de materiales transportados por corrientes de agua) y coluviales (depósitos de ladera, producto de desprendimientos o deslizamiento de roca o suelo) depositados cuando permanecen sin recibir nuevos aportes de sedimentos por un cierto periodo de tiempo. (INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA- COSTA RICA), 2015).

También podemos definir los inceptisoles como suelos que comienzan a desarrollarse, estos suelos carecen de una presencia de horizontes formada durante el tiempo. Los factores más importantes para la formación de estos suelos son el tiempo, el clima y las zonas con pendientes muy pronunciadas. El factor principal es el tiempo, ya que

es necesario el paso de los años para que un suelo se desarrolle y se depositen diferentes horizontes sobre este. En cuanto al clima, este suelo se desarrolla en términos de humedad variable, el drenaje de este no es significativo. Por otro lado, este suelo está presente en zonas con grandes pendientes y una elevada erosión que ocasiona continuamente el desprendimiento de la parte superficial del terreno, como ocurre en los municipios al norte de Cartago. (Ibáñez Asensio et al., 2011)

Respecto a la zona en la que nos encontramos, la Cordillera Central de Costa Rica, formada por una cadena de volcanes, es importante destacar la acumulación de cenizas procedentes de los volcanes Irazú y Turrialba. Esto, sumado a la altitud de la zona (unos 2335 msnm), y teniendo en cuenta que en la zona se desarrollan abundantes vientos asociados a suaves precipitaciones, el resultado es una gran lixiviación del material superficial.

En cuanto a las características agronómicas de estos suelos, cabe destacar una baja compactación y un alto contenido en materia orgánica, lo que se traduce en suelos muy fértiles y con una gran aptitud para el cultivo de variedades hortícolas durante todo el año. Las parcelas agrícolas del norte de Cartago cuentan con una importante acumulación de calcio, magnesio, potasio y una reducción de la acidez con el paso de los años. (Ramírez et al., 2008).

También cabe resaltar el aumento anual de la fertilidad de estos suelos, debido a los frecuentes aportes de materia orgánica por parte de los agricultores en cada ciclo de cultivo. Esto aporta niveles muy importantes de fósforo a la planta, el cual tiene un papel fundamental en la transferencia de energía en la planta, lo que permite una mejor nutrición orgánica en el cultivo.

Pese a ser una región fresca y con abundantes precipitaciones en época de lluvias, debido al cambio climático, los productores sufren la escasez de agua a la hora de establecer el riego en sus cultivos. Los problemas de escasez se deben al desabastecimiento y la contaminación del agua, causada por residuos o desechos y productos fungicidas usados en la agricultura.

- 2- Justificación

La motivación para la realización del proyecto es la innovación y sostenibilidad, comenzando por el estudio y asesoramiento de un productor modelo, mediante el muestreo de los datos de humedad, se harán recomendaciones de riego y actividades de asesoramiento. Estas estarán basadas en los datos obtenidos desde el suelo, el estado de crecimiento del cultivo y el estado del clima.

Posteriormente se pretende que el proyecto pueda tener lugar en diferentes parcelas de otros productores, contribuyendo así a la modernización de la zona y la orientación sobre nuevas prácticas a los productores locales.

Debido a la situación actual de globalización, el proyecto debe relacionarse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

1) Aumentar la eficiencia agrícola y los ingresos de los pequeños productores de alimentos- se estima reducir el consumo de agua entre un 30% y un 50% (FAO, 2012), esto se verá reflejado en un menor uso de la electricidad, por lo que los costes de producción serán menores.

2) Implementar prácticas sostenibles para el manejo adecuado de productos químicos y residuos en todas las etapas de su ciclo, mediante la agricultura orgánica- concienciar a los productores para usar productos fitosanitarios cuando son verdaderamente necesarios.

3) Mejorar la capacidad de resistencia y adaptación frente a riesgos climáticos y desastres naturales- utilizando mejores cultivares o modificando los sistemas de plantación.

- 3- Delimitación del problema

Costa Rica posee dos estaciones bien marcadas a lo largo del año: época de lluvias (de mayo a noviembre) y época seca. Debido a los episodios de variabilidad climática actual, en los últimos años se están produciendo patrones climáticos irregulares: temporadas de lluvias poco intensas y sequías muy prolongadas.

El problema que nos ocupa, es una temporada de sequía cada vez más larga, esto reduce los recursos hídricos como balsas o el agotamiento de los acuíferos, al disminuir el agua disponible para la agricultura, se reduce el rendimiento.

Debido al crecimiento de las zonas urbanas con el aumento de la población y un mayor turismo, esto contribuye a reducir el agua disponible y causa una sobre explotación de los recursos hídricos disponibles. Manteniendo a la agricultura, en ocasiones, con un acceso limitado para el riego de los cultivos.

Otro problema de Costa Rica respecto al riego es la falta de infraestructura moderna y sostenible. A causa de los periodos tan largos de sequía, se requieren infraestructuras de captación, almacenamiento y distribución precisa del agua hacia el cultivo.

La gestión de los recursos líquidos es esencial en la producción y en la rentabilidad de los cultivos en el área, dada la situación actual de restricción de agua en la región. Por lo tanto, es crucial investigar nuevas técnicas para la automatización y administración efectiva del agua en la actividad agrícola. Con el uso de sensores de humedad, se pretende conseguir una reducción en el uso de recursos hídricos

Con el objetivo de evitar la escasez de agua, la principal solución es la gestión del agua de manera simple y tecnológica, optimizando al máximo este recurso: realizar riegos más cortos solo durante periodos de verdadera necesidad para la planta.

El proyecto viene motivado a causa de un uso excesivo en el consumo de agua en la zona del Sanatorio Duran (Cartago). Con el uso de sensores y una herramienta de fácil

interpretación para los productores se podrá aplicar el riego en el momento exacto en que las plantas demanden el agua, por ende se producirá un ahorro de agua y un menor coste de energía eléctrica. Gracias a este ajuste sobre el riego se podrá mejorar la calidad del cultivo, promoviendo el desarrollo del bulbo y con un mayor control sobre la parte aérea.

- 4- Introducción

Los productos cultivados al norte de Cartago tienen una gran importancia económica para la economía de los recursos agroalimentarios de Costa Rica. Los resultados anuales de Costa Rica según FAO (2023) son una producción de 19000 toneladas de zanahoria, 78000 toneladas de patatas y 45700 toneladas de cebolla.

La actividad agrícola supone en Costa Rica un 4,5% del PIB, en crecimiento frente a los años anteriores, además, el conjunto de agricultura ampliada (producción agrícola + sector agroindustrial) supone un 10% del PIB, según la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (2022).

En cuanto a la zona norte de Cartago, esta es caracterizada por el fomento de labores agrícolas, cuenta con una red social e institucional específica; es rica en recursos naturales locales, con estructuras de organización, producción, distribución, comercio y expresiones culturales compartidas.

Los suelos pertenecientes al área de estudio, tienen un alto contenido en materia orgánica, debido a las continuas emanaciones de ceniza por parte del volcán Turrialba, gracias a esto y a un clima húmedo y con temperaturas suaves y constantes todo el año, poseen un alto potencial para el cultivo de hortalizas.

La agricultura es la principal fuente de ingresos en las poblaciones rurales y ocupa la segunda posición como productor de empleo a nivel nacional. Costa Rica es un país exportador de productos agropecuarios como frutas, hortalizas, café o cacao; reconocidos mundialmente por su calidad y gran valor organoléptico.

Los problemas del agua en la agricultura son una preocupación creciente debido a la variabilidad climática y la actual presión sobre el uso de los recursos hídricos. La irregularidad en las precipitaciones, causada por el cambio climático, provoca tanto sequías prolongadas como inundaciones, afectando la disponibilidad y calidad del agua para el riego.

Además, la competencia por el agua entre diferentes sectores, como el agrícola, el urbano y el industrial; incrementa las tensiones, especialmente en regiones donde la infraestructura para la gestión del agua es insuficiente. La contaminación de fuentes hídricas por el uso excesivo de agroquímicos agrava la situación, afectando la salud del suelo y la productividad agrícola. Estos desafíos requieren una gestión integral y sostenible del agua, incluyendo la implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo y riego eficiente para asegurar la viabilidad a largo plazo de la agricultura en el país.

En el caso concreto de la zona norte de Cartago, los productores se enfrentan a los siguientes desafíos:

- En estas parcelas el principal problema es la orografía, ya que la mayoría de ellas tienen una gran inclinación. Debido a esto, y combinado con las tradicionales prácticas de mecanización que se desarrollan en el lugar cada vez que se cambia de cultivo, esta zona sufre una gran erosión y enormes pérdidas de suelo cada año, hasta 100 toneladas por hectárea y año (FAO, 2020).
- Estacionalidad de la épocas seca y lluviosa.
- Escasa disponibilidad de agua durante el verano, debido a la ausencia de lluvias los cultivos demandan un mayor consumo de agua, pero con la ausencia de precipitaciones los reservorios de agua son escasos.
- También cabe destacar los problemas agronómicos asociados a un exceso de agua y fertilización nitrogenada, como el aumento de fisiopatías y enfermedades.
- En la zona norte de Cartago se han obtenido datos de pérdida de suelo por lluvias intensas de 108 t/ha en un solo día.

Con el objetivo de evitar la escasez de agua y reducir el uso de esta, desde hace varios años en la zona de estudio se vienen implementando diferentes alternativas para promover un uso más eficiente y sostenible del agua.

En cuanto a tecnología, el riego por goteo es la técnica más utilizada, ya que aplica el agua en la zona radicular de las plantas, de manera que así aumenta la eficiencia del riego. Además de utilizar sistemas de riego automatizado con sensores y temporizadores para ajustar la cantidad de riego a las condiciones del momento.

También muchos productores han construido en los últimos años balsas o tanques para el almacenamiento de agua durante el periodo de lluvias y su uso durante el periodo seco.

En el presente estudio se pretende implementar sensores de humedad relativa, temperatura y humedad del suelo, obteniendo así un ajuste muy preciso a la hora de aplicar el riego. Contando también con un software para la recopilación de los datos y ajustar la cantidad de riego.

- 5- Objetivos

Objetivo general:

Este trabajo nace con el propósito de generar un modelo de gestión para la mejora en el uso y aprovechamiento del agua mediante el monitoreo en sistemas de riego de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago.

Objetivos específicos:

- Caracterizar la demanda hídrica de los cultivos presentes en las parcelas de estudio mediante la integración de la información del proyecto: “*Propuesta de modelo de automatización de los sistemas de riego mediante aplicación de técnicas de agricultura de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago*” para obtener los parámetros de monitoreo.
- Diseñar un sistema de monitoreo continuo de humedad en el suelo, mediante el sensoramiento en un sistema modelo para conocer los requerimientos hídricos de los cultivos hortícolas que se desarrollan en la zona.
- Realizar recomendaciones a los productores en el manejo del riego, mediante aplicación del sistema de monitoreo para contribuir en buenas prácticas agrícolas y sostenibles en el ahorro de agua.

- 6- Revisión de literatura

En Costa Rica, el clima puede variar desde tropical húmedo hasta subtropical, el agua de riego es necesaria para compensar los periodos de sequía o lluvias irregulares, garantizando un suministro constante de agua para los cultivos.

El país se caracteriza por poseer una época seca y una lluviosa bien definidas. La época seca se extiende de diciembre hasta marzo. Mientras, abril es un mes de transición. Marzo es el mes más seco y más cálido. El comienzo de la estación seca depende de la latitud, ya que comienza en el noroeste de la vertiente y de concluye en el sureste. Lo contrario sucede con el inicio de la época lluviosa.

La temporada lluviosa va de mayo hasta octubre, siendo noviembre un mes de transición. Con una disminución relativa de la cantidad de lluvia durante los meses de julio y agosto (veranillo o canícula) cuando se intensifica la fuerza de los vientos Alisios. (Instituto Meteorológico Nacional, 2015)

Los meses más lluviosos son septiembre y octubre debido principalmente a la influencia de los sistemas ciclónicos y los vientos Monzones procedentes del océano Pacífico ecuatorial y las brisas marinas, que son responsables de las lluvias intensas cuando unen su efecto a las barreras orográficas (Muñoz et al 2002).

El crecimiento de la población mundial (Tilman et al., 2002), asociado al cambio climático y la crisis del agua, plantean la necesidad de investigar para generar nuevas tecnologías que permitan enfrentar la creciente demanda mundial de alimentos (Galloway et al., 2004). Debemos conocer el tipo de suelo, sus características químicas y físicas, el clima y las condiciones ambientales son fundamentales. Además es importante examinar la forma en cómo se aplicarán ya que esto aumenta o disminuye la cantidad final de fertilizante o agua que está disponible para la planta. (User, s. f.)

Dado que los cultivos hortícolas de la zona tienen altas demandas de agua, el riego permite una distribución eficiente y controlada del recurso, optimizando su uso y minimizando el desperdicio.

El correcto uso del agua garantiza que la planta cuente con los nutrientes necesarios para su óptimo crecimiento, facilita una utilización sensata del fertilizante y promueve efectos positivos tanto en el entorno como en los costes de producción de los agricultores. («Producir Más, Con Menos: Eficiencia del Uso de Agua En Riego», 2024). La eficiencia en el uso del agua es la cantidad de rendimiento del cultivo por unidad de agua consumida por la planta. (Eticha, 2024)

En el caso de contar con la posibilidad de proporcionar un suministro constante de agua, el riego permite una producción más predecible y consistente a lo largo del año, lo que es crucial para la industria agrícola y para mantener un suministro estable de alimentos.

Se busca llevar a la planta hacia un pequeño estrés hídrico controlado, (Peng et al. 2005) indicó que un leve estrés hídrico durante la etapa de maduración podría incrementar la calidad del fruto, (*Capítulo 4. Respuesta A Estrés Hídrico Controlado del Pimiento Durante la Maduración del Fruto*, 2021) esto puede ser extrapolable al caso de la cebolla, ya que ambas son especies hortícolas con grandes necesidades hídricas.

Los aportes de materia orgánica reducen la compactación del suelo, incrementan los espacios porosos y mejoran la infiltración del agua. Estos trabajos en el suelo también aumentan la capacidad de retener y absorber más agua y con ello se disminuye la frecuencia de riego. De esta manera se promueve una mayor absorción e infiltración del agua de lluvia, evitando o reduciendo la erosión. (INTA- COSTA RICA, 2015)

Un riego en la cantidad adecuada puede ayudar a reducir la propagación de enfermedades fúngicas y bacterianas, ya que mantener un nivel constante de humedad en el suelo puede evitar condiciones propicias para su desarrollo.

Los 3 cultivos a tener en cuenta (cebolla, patata y zanahoria) son los más cultivados en la zona norte de Cartago; cabe destacar en el caso de la cebolla y la patata la necesidad de realizar aporcados de unos 30-35 cm, con el objetivo de obtener un tubérculo de mayor tamaño y evitar la coloración verde en el órgano.

- **6.1. El cultivo de cebolla:**

- **6.1.1. Características del cultivo de la cebolla**

La cebolla tiene un sistema radical compuesto por raíces blancas y simples, al inicio se genera una raíz primaria que muere pronto, a partir de ese disco se desarrolla las raíces adventicias en un disco basal. Encima del tallo o disco caulinar, crecen las hojas de color verde claro o verde oscuro. El bulbo está compuesto por hojas que se engrosaron en la base y se conocen como catafi las. Las hojas exteriores se secan y forman túnicas, las cuales protegen al bulbo parcialmente contra enfermedades, quemaduras de sol y de las

heridas por golpes en el transporte. (*Manual de Recomendaciones Para el Cultivo de Cebolla (Allium Cepa L.)*, 2012).

La cebolla es un cultivo muy sensible al exceso de humedad, requiere un buen drenaje por parte del suelo, para evitar podredumbre en el bulbo, lo ideal es contar con un suelo de textura ligera-media y una profundidad de 35-50 cm. En este cultivo los riegos se deben establecer cada 15 o 20 días dependiendo de la lámina aplicada, la capacidad de retención del suelo, además de detener la humedad 3 semanas antes de la recolección para incrementar la conservación.

- 6.1.2. Necesidades hídricas de la cebolla

Las condiciones óptimas para el cultivo de la cebolla son precipitaciones entre 350 – 600 mm, acompañadas de un buen riego, nos dejan una necesidades netas entre 2500 y 5500 m³/ha. En estudios realizados en Tierra Blanca (Cartago) estimaron que la cantidad de agua utilizada para producir una tonelada de cebolla era de 255 m³ en promedio según la variedad y la época de cultivo. (Masis-Meléndez, 2022)

En la parte oeste de San José, Heredia y Alajuela, los semilleros se inician en septiembre y octubre para trasplantarse durante las últimas lluvias o inicios de la época seca, y se maneja todo el cultivo con riego. Mientras que en Cartago la siembra más importante se inicia con la estación lluviosa, de mayo a junio, y se cosecha en los meses de setiembre y octubre los cuales son los que presentan la mayor precipitación del año. En esta región los últimos años los productores han apostado por siembras tardías. En estas se aprovechan las últimas lluvias para realizar la siembra y se recurre al riego en las últimas semanas del cultivo, optimizando así los recursos hídricos existentes. En la zona alta de Cartago, el ciclo del cultivo es más largo o de mayor duración que en las tierras bajas, debido a que presenta una temperatura y luminosidad menor según aumenta la altitud. (*Manual de Recomendaciones Para el Cultivo de Cebolla (Allium Cepa L.)*, 2012)

En el cultivo de la cebolla el riego se debe realizar cuando se ha agotado alrededor del 25 al 35% del agua disponible, numerosos autores recomiendan una frecuencia de entre 3 a 5 días, según el contenido de humedad presente en el suelo y las lluvias. Es aconsejable no llevar el cultivo al estrés hídrico ya que esto afecta la tasa de crecimiento y al rendimiento del cultivo, es decir, la producción final.

De acuerdo con PROAIN (2020), para la zona central de México, país donde realizan riego en el 97,4% de la superficie sembrada, la lámina neta fluctúa entre los 2500-5500 m³/ha, dependiendo de la zona, variedad y pluviometría del cultivo.



Ilustración 1- Semillero de cebolla en parcela modelo

- **6.2. El cultivo de patata:**

- **6.2.1. Características del cultivo de la patata**

El cultivo de la papa representa en Cartago un total de 2800 ha. El cultivo de la papa se adapta a una amplia gama de suelos, pero se prefieren aquellos cuya textura favorezca una buena aireación, drenaje y penetración profunda de las raíces. Es decir, suelos permeables, con una profundidad de unos 30 cm, un pH neutro (entre 5 y 7) y una buena estructura que facilite la preparación del suelo, el manejo del cultivo implantado y la cosecha. No son recomendables los suelos arenosos, ya que en época de sequía retienen muy poca humedad. (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2017). En terrenos de ladera, como es el caso de la zona norte de Cartago, se recomienda utilizar siembras de contorno, acequias de ladera, canales de guardia y gavetas (Wong 2013).

El cultivo de la papa se establece en el suelo durante unos 4 meses, según el cultivar. En la zona norte de Cartago tradicionalmente se siembra entre los meses de mayo-junio y en octubre-noviembre, para realizar la cosecha entre agosto-septiembre y en enero-febrero.

- **6.2.2. Necesidades hídricas de la patata**

En cuanto a necesidades hídricas, el cultivo de la patata requiere lluvias distribuidas a lo largo de todo el ciclo, entre 400 y 800 mm, dependiendo de la variedad, especialmente durante la formación de tubérculos. En la provincia de Cartago el promedio de precipitaciones varía entre 1400 a 2600 mm al año, lo que lo hace idóneo para el cultivo de la papa. (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2017).

En condiciones de suministro hídrico limitado, el suministro disponible, debería centrarse en maximizar el rendimiento por hectárea en lugar de repartir el agua limitada en

un área más grande. Se puede ahorrar agua a través de un calendario mejorado y profundidad de la aplicación del riego (Steduto et al., 2012).

La patata es vulnerable a la falta de agua. La carencia hídrica puede causar una disminución en la producción de tubérculos, en tamaño y cantidad, y una importante merma en su calidad. Para maximizar el rendimiento, no se debe permitir que el agua disponible en el suelo se agote más del 30 al 50%. El déficit hídrico en la primera etapas, durante la formación de estolones, la brotación de tubérculos y después de la misma, tiene los efectos más adversos en el rendimiento final (Steduto et al., 2012).

- **6.3. El cultivo de zanahoria:**

- **6.3.1. Características del cultivo de la zanahoria**

En Costa Rica la mayor concentración en el cultivo de zanahoria se sitúa en Cartago, debido a la buena adaptación de esta a la temperatura, esto produce unos rendimientos de entre 30 a 65 t/ha según la variedad. El cultivo de zanahoria es especialmente competitivo en cuanto a agua en unos 50 cm en todas las direcciones del suelo y muy exigente en humedad, esto diferencia el peso seco total de la raíz, además de la competencia por la luz y los nutrientes. (Currah y Barnes, 1979).

Las condiciones de temperatura y tipo de suelo en los territorios al norte de Cartago, Heredia y Alajuela; permiten producir zanahorias de buena calidad, prácticamente durante todo el año (Bolaños, 1998).

- **6.3.2. Necesidades hídricas de la zanahoria**

El riego es crucial durante todas las etapas del cultivo de zanahoria. Durante la germinación, es especialmente crítico, requiriendo agua de manera constante en pequeñas cantidades. Durante el alargamiento de la raíz, se debe limitar el riego para fomentar un crecimiento más profundo. A medida que se acerca el período de tuberización, la necesidad de agua aumenta para garantizar un buen calibre de las raíces. En esta etapa, se requiere un riego más frecuente y en volúmenes mayores. Durante la fase de máximo desarrollo foliar, la demanda de agua es máxima, con el objetivo de aumentar el rendimiento y calidad de las raíces. En este momento, el riego debe ser frecuente y en volúmenes elevados para mantener el suelo cubierto por el follaje y asegurar el suministro adecuado de agua a la planta.

Según datos de Núcleo Ambiental (2015) el volumen de agua requerido por el cultivo es de 400 a 800mm al año. Dependiendo del tipo de suelo y el clima, para suelos con buena proporción de limos, arcillas y arenas y un clima fresco se puede dar una vez por semana, mientras que para suelos arenosos y clima caliente puede darse inclusive hasta 2 veces por semana. El riego se debe realizar cuando este se ha agotado un 35% del Agua Disponible. (Instituto Tecnológico de Costa Rica Vicerrectoría de Investigación y Extensión, 2023).

- **6.4. El riego agrícola**

Existen diferentes alternativas a la hora de aplicar el riego. Según el tipo de cultivo, la orografía del terreno, la capacidad tecnológica del productor, y la disponibilidad del recurso hídrico; podemos establecer 3 métodos de riego:

- **6.4.1. Riego superficial**

El riego superficial, es el más usado en Costa Rica debido a su simplicidad y eficiencia debido a las características del terreno y los cultivos. Esta modalidad presenta algunas variaciones, como el riego por surcos o riego por inundación. Es común en el cultivo de la papa y la cebolla. Y es la forma de riego menos eficiente respecto al uso del recurso hídrico y el uso de la lámina de agua en el cultivo, posee un 50% de eficiencia. (Senara, s. f.)

- **6.4.2. Riego por aspersión**

El riego por aspersión, con un 70% de eficiencia, consiste en la aplicación de agua sobre el cultivo en forma de pequeñas gotas a través de aspersores, consiste en aplicar agua al suelo simulando una lluvia (Instituto de Investigaciones Agropecuarias Centro Regional de Investigación Carillanca, 2001). Este método es el más versátil, se adapta a una gran variedad de cultivos, incluyendo hortalizas, es la forma más usada en el cultivo de la zanahoria (*Riego Por Aspersión*, s. f.).

- **6.4.3. Riego localizado**

El riego localizado o riego por goteo es el más eficiente en el uso del agua (90- 95% de eficiencia) y posee una gran capacidad para dirigir el riego directamente a las raíces. El riego por goteo consiste en aplicar riego por medio de mangueras delgadas o cintas, que tienen agujeros cada cierta distancia con goteros, los cuales permiten que el agua salga en forma de gotas localizadas y así las raíces captan mejor el agua (Pérez, 2022).

En situaciones donde el recurso hídrico es limitado esta es la forma de riego aconsejada, con una alta eficiencia sobre el riego, esto permite trabajar en una agricultura sostenible. (Agua Regenerada En Agricultura: Una Solución Real y Sostenible Para Combatir la Escasez Hídrica, s. f.)

Debido a que el área de humedad o la lámina húmeda es menor, el agua es aplicada sólo donde la planta la necesita, por lo que se obtiene un ahorro de agua mucho mayor. Este método es especialmente adecuado para cultivos hortícolas, ya que permite una distribución precisa del agua y reduce las pérdidas por evaporación y escorrentía. (*¿Cómo Influye la Humedad En la Calidad de los Cultivos?* | *PRO-MIX*, s. f.)

- **6.5. Diseño del sistema de riego:**

- Diseño agronómico, consiste en calcular los parámetros para cubrir las necesidades hídricas de la planta. Mediante la aplicación de una lámina de agua, según el tipo

de suelo, las características del cultivo, las variables climatológicas y la eficiencia del sistema de riego utilizado.

- La lámina neta es la cantidad de agua que se aplica al suelo para reponer la evapotranspiración del cultivo, que disminuye la humedad aprovechable disponible, dejándolo en condiciones de máxima retención (Etcheverry, 2021).
 - La eficiencia de riego es la relación entre el volumen de agua que llega a la zona radicular de la planta y el volumen total de agua suministrada por el sistema de riego. Este valor, varía según el sistema de riego utilizado, como ya se ha comentado anteriormente (Ministerio de Agricultura y Riego, 2015).
 - La lámina bruta se calcula como la cantidad de agua aplicada, obtenida dividiendo la lámina neta por la eficiencia del sistema de riego.
 - La frecuencia de riego se refiere al intervalo de tiempo necesario para volver a aplicar agua con el objetivo de compensar la evapotranspiración real.
 - El tiempo de riego es el periodo durante el cual se debe aplicar la lámina bruta necesaria para satisfacer las demandas hídricas del cultivo.
- Diseño hidráulico, consiste en la descripción y cálculo de todos los materiales para aportar el agua desde la balsa hasta la planta, a través de tuberías y mediante emisores o goteros en la parcela.
- Las tuberías transportan el agua desde la toma en la balsa hasta el cultivo. El material más utilizado es el PVC. En un sistema de riego, es habitual distinguir entre dos tipos de tuberías:
 - Tubería principal, encargada de llevar el agua hasta las tuberías laterales.
 - Tubería lateral, responsable de distribuir el agua desde la tubería principal hasta los emisores.
 - Los emisores transportan y aportan el caudal desde la tubería lateral hasta el cultivo. Existen dos principales tipos de emisores en sistemas de riego (Liotta, 2015):
 - Goteros: con el objetivo de diluir la presión, y un caudal entre 1 y 4 litros/hora. Estos pueden ser:
 - De laberinto: Tienen un conducto largo para reducir la presión del agua. Funcionan con un flujo turbulento, son resistentes a cambios de temperatura y obstrucciones.
 - Tipo Vortex o de botón: El agua pasa por un orificio y entra en una cámara tangencial, creando un movimiento en espiral que disminuye la presión antes de salir en forma de gota.
 - Cintas: Utilizadas en cultivos de temporada, como hortícolas. Tienen emisores espaciados entre 0,20 y 0,60 m, trabajan a baja presión.
 - Las válvulas son el dispositivo que inicia o detiene el flujo del agua en la conducción, controlan el flujo de agua.
 - La bomba impulsa el agua desde la balsa hasta la parcela a través de las tuberías. Según la fuente de agua se puede elegir entre:

- Bombas centrífugas: necesitan un caudal constante y se usan en grandes extensiones.
- Bombas de diafragma: son adecuadas cuando el agua presenta partículas sólidas en suspensión.
- Bombas sumergibles: utilizadas en el caso de pozos de gran profundidad.
- Bombas de desplazamiento positivo: sistemas con un caudal constante y preciso, como el riego por goteo o fertirrigación.

- 6.6. Gestión y monitoreo del riego agrícola

Los sensores climáticos monitorean condiciones ambientales como la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación. Estos datos son cruciales para prever condiciones meteorológicas adversas y tomar decisiones informadas sobre la protección de los cultivos y el momento adecuado para la siembra y la cosecha. (Manual de Buenas Prácticas Para la Generación, el Almacenamiento y la Difusión de Informática Climática En Instituciones y Organismos del MERCOSUR, 2015)

Para llevar a cabo una buena utilización de los diferentes sensores, es importante tener en cuenta algunas recomendaciones:

- En cuanto a la instalación, se deben colocar los sensores en puntos estratégicos del campo para obtener una representación precisa de las condiciones tanto del aire como del suelo.

- Para la integración de sistemas de datos, es considerable utilizar software de gestión agrícola que analice los datos de temperatura y proporcione recomendaciones sobre el riego.

- En relación al personal agrícola es interesante dotar una pequeña formación periódica para asegurar que el personal agrícola esté capacitado en el uso de los datos de temperatura para la toma de decisiones.

- Con respecto al monitoreo, este debe de ser continuo y ajustar las prácticas de riego según las variaciones de temperatura.

- 6.6.1. Instrumentación para la toma de datos

La agricultura moderna se ha visto beneficiada enormemente por el avance de la tecnología, especialmente en el campo de la instrumentación para la toma de datos. Esta instrumentación permite a los agricultores recopilar, analizar y utilizar información detallada sobre sus cultivos y condiciones ambientales, optimizando así la eficiencia y la productividad de sus explotaciones agrícolas.

La utilización de sensores remotos para el monitoreo de condiciones climatológicas resulta útil para la toma de decisiones que se relacionan con la fisiología y mejora de los cultivos, también en la calidad y cantidad de estos.

Los sistemas de Posicionamiento Global o GPS son fundamentales para la agricultura de precisión. Permiten a los agricultores mapear sus campos con gran precisión y gestionar mejor la aplicación de insumos como semillas, fertilizantes y pesticidas, reduciendo el desperdicio y mejorando la eficiencia (Balafoutis et al. 2017).

En conclusión, la instrumentación para la toma de datos en agricultura es una herramienta esencial en la era de la agricultura de precisión. Al integrar tecnologías avanzadas en la gestión agrícola, los agricultores pueden lograr una mayor eficiencia, productividad y sostenibilidad en sus prácticas, asegurando así la seguridad alimentaria y la conservación de los recursos naturales.

- 6.6.1.1. Sensor de humedad relativa

En el contexto de la agricultura moderna, el monitoreo de la humedad relativa del aire se ha convertido en una herramienta esencial para optimizar el uso del agua en los cultivos. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también mejora la eficiencia operativa y reduce los costos asociados con el riego. (Evans, R. G., & Sadler, E. J., 2008).

La humedad relativa del aire, que es la cantidad de vapor de agua presente en el aire en comparación con la cantidad máxima que el aire puede retener a una determinada temperatura, influye directamente en la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. Al comprender y monitorear este parámetro, los agricultores pueden tomar decisiones más informadas sobre cuándo y cuánto regar sus cultivos. (Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I., 2012). (Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. D, 2005).

El monitoreo de la humedad relativa se realiza principalmente mediante el uso de sensores ambientales y estaciones meteorológicas. Estos dispositivos recopilan datos en tiempo real sobre las condiciones atmosféricas, proporcionando una visión detallada y precisa de los niveles de humedad. Los datos obtenidos pueden ser integrados en sistemas de gestión agrícola basados en la nube, permitiendo a los agricultores acceder a información actualizada desde cualquier lugar. (Jones, H. G., 2004).

Realizar un monitoreo continuo y ajustar las prácticas de riego según las condiciones cambiantes, especialmente durante los periodos de crecimiento críticos para las plantas.

- 6.6.1.2. Sensor de temperatura

En la agricultura moderna, el monitoreo de la temperatura del aire y del suelo es una práctica crucial para la optimización del riego. Comprender cómo las variaciones de temperatura afectan las necesidades hídricas de los cultivos permite a los agricultores reducir el uso de agua, mejorar la eficiencia y promover la sostenibilidad.

La temperatura es un factor determinante en la evaporación del agua del suelo y en la transpiración de las plantas. Las altas temperaturas pueden incrementar significativamente la demanda de agua, mientras que las temperaturas más bajas pueden reducirla. Por ello, un monitoreo preciso y continuo de la temperatura permite ajustar el

riego de manera que se aplique solo la cantidad necesaria de agua, evitando el desperdicio. (Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M., 1998).

Con datos precisos sobre la temperatura, los agricultores pueden ajustar sus sistemas de riego para aplicar solo la cantidad de agua necesaria. Por ejemplo, durante periodos de altas temperaturas, se puede incrementar el riego para compensar la mayor pérdida de agua por evaporación y transpiración. En contraste, durante periodos más frescos, el riego puede reducirse. (Jones, H. G., 2013).

Al aplicar solo el agua necesaria según las condiciones de temperatura, se promueve un uso más eficiente y sostenible del agua. Esto es particularmente importante en regiones donde el recurso es escaso. Un menor uso de agua se traduce en menores costos de energía y recursos necesarios para el riego. Además, la eficiencia en el uso del agua puede mejorar la salud y el rendimiento de los cultivos, lo que también contribuye a reducir costos. (Hatfield, J. L., & Prueger, J. H., 2015).

El riego adecuado según la temperatura ayuda a mantener las plantas en condiciones óptimas, evitando problemas como el estrés hídrico o la proliferación de enfermedades relacionadas con el exceso de humedad, por lo que mejorará la salud del cultivo. (Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D., 2012).

El monitoreo de la temperatura es una estrategia esencial para optimizar el riego en la agricultura moderna. Al utilizar tecnologías avanzadas para medir y analizar la temperatura del aire y del suelo, los agricultores pueden reducir significativamente la cantidad de agua utilizada sin comprometer la salud y el rendimiento de sus cultivos. Esta práctica no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también promueve la sostenibilidad y la conservación de recursos, contribuyendo a un futuro agrícola más resiliente y sostenible.

- 6.6.1.3. Sensor de humedad en el suelo

El funcionamiento del sensor de humedad del suelo es sencillo. La estructura del sensor incluye dos electrodos resistivos que se encargan de medir la resistencia eléctrica del suelo. La humedad del suelo influye directamente en esta resistencia. En un suelo altamente húmedo, se forma un corto circuito entre las dos terminales, lo que resulta en una resistencia muy baja o prácticamente nula. Por el contrario, en un suelo extremadamente seco, la resistencia medida es considerablemente alta.

En términos operativos, el sensor cuenta con dos sondas que se insertan en el suelo, y la medición se realiza a través de la resistencia eléctrica entre estas dos sondas. Cuanto menor sea la resistencia detectada, mayor será la humedad presente en el suelo. Esto se debe a que la resistencia eléctrica y la humedad del suelo son inversamente proporcionales: a mayor contenido de humedad, menor resistencia, y viceversa. Es decir, cuando el sensor detecta mucha humedad alrededor de sus sondas, la resistencia eléctrica disminuye significativamente. Esto se explica porque el agua en el suelo facilita la conducción eléctrica

entre los electrodos. En un ambiente seco, la falta de agua resulta en una mayor resistencia porque el suelo seco actúa como un aislante.

Este principio de operación permite a los agricultores e ingenieros agrónomos ajustar los sistemas de riego de manera eficiente. Al recibir datos precisos sobre la humedad del suelo, pueden evitar tanto el riego excesivo, que desperdicia recursos y puede dañar las plantas, como el riego insuficiente, que puede afectar negativamente el crecimiento de los cultivos.

Además, estos sensores de humedad son esenciales para mantener un equilibrio adecuado en el ecosistema agrícola, contribuyendo a una gestión sostenible del agua. La información proporcionada por los sensores puede integrarse en sistemas de gestión automatizados, mejorando así la productividad y sostenibilidad de las prácticas agrícolas. (UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA, 2015)

- 6.6.2. Análisis de la información

Para medir la humedad relativa y capacitancia eléctrica del suelo, se usaran los sensores de humedad relativa y del suelo instalados en la parcela del productor modelo. Además con un análisis de suelo de esta parcela se establecerá la capacitancia eléctrica y la textura de este.

Una vez obtenidos los datos de humedad en la parcela, con la ayuda de un software se calculará la evapotranspiración, esto también depende del cultivo establecido, lo habitual para este productor es papa, cebolla o zanahoria. Cultivos, los cuales ya se han explicado las características y particularidades de cada uno, en el apartado 6- *Revisión de literatura*.

Posteriormente se hará una primera programación del riego, sujeta a cambios posteriores.

Con los sensores en funcionamiento monitoreando de las condiciones ambientales y disponibilidad de agua en el suelo, se obtendrán datos reales sobre el estado del suelo.

Finalmente gracias a la ayuda de un software con todos los datos y variaciones, se procederá al ajuste de la programación de los riegos según necesidades y tratamiento de los datos en una gráfica a color, indicando al agricultor el momento exacto en el que es verdaderamente necesario aplicar el riego, como ya se ha visto al comienzo de este apartado.

Con esta información, el modelo podría generar recomendaciones sobre el momento óptimo para aplicar el próximo riego, asegurando que se suministre la cantidad adecuada de agua en el momento preciso para satisfacer las demandas de las plantas y evitar tanto el estrés hídrico como el exceso de riego, lo que maximizaría la producción agrícola y minimizaría el desperdicio de recursos hídricos. En resumen, este modelo de gestión proporcionaría al agricultor una herramienta efectiva para tomar decisiones informadas sobre el riego, optimizando así el uso del agua y mejorando la productividad de sus cultivos.

- 7- Metodología del proyecto

La zona norte de Cartago, en Costa Rica, es reconocida por su rica historia agrícola y ganadera. La mayoría de su población depende directamente del sector primario para su sustento, destacándose por la producción de cultivos y la cría de ganado. Sin embargo, este sector enfrenta diversos desafíos que amenazan su sostenibilidad y desarrollo.

Uno de los problemas más apremiantes en la agricultura, tanto a nivel nacional como internacional, es el desinterés del sector oficial por financiar y organizar la investigación científica. Según Alvarado y Navarro (2005), este aspecto es de vital importancia para el desarrollo agrícola. La falta de inversión en investigación limita la innovación y la adopción de nuevas tecnologías que podrían mejorar la productividad y sostenibilidad del sector.

Las comunidades rurales de la zona norte de Cartago, que en su mayoría se dedican a actividades agrícolas, han sido marginadas en términos de capacitación, técnicas, métodos y tecnología agrícola. Esta falta de apoyo y recursos no contribuye en nada a mejorar el esquema productivo y de desarrollo económico a nivel regional. La marginación impide que los agricultores adopten prácticas modernas que podrían aumentar la eficiencia y calidad de sus productos. Por este motivo el TEC se implica en numerosos proyectos cada año, atendiendo tanto al sector primario y en consecuencia a su población. Los productores también cuentan con el apoyo del INTA (Instituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias) que ofrece capacitación y educación a los productores. Al proporcionar formación adecuada, los agricultores podrían mejorar significativamente sus técnicas de siembra y cosecha, optimizar los sistemas de riego y manejar mejor los drenajes, lo cual evitaría la pérdida de cosechas por malas prácticas.

El deterioro del suelo en la zona norte de Cartago es otro problema crítico. Según Cubero (1994), este deterioro es causado por la práctica de la agricultura convencional, que se ha convertido en la actividad económica de mayor impacto ambiental negativo en la región. Los paisajes de la zona son topográficamente complejos, y el desarrollo agrícola no ha tenido en cuenta la capacidad de uso del suelo, lo que ha resultado en un uso inadecuado de la tierra y su rápido deterioro.

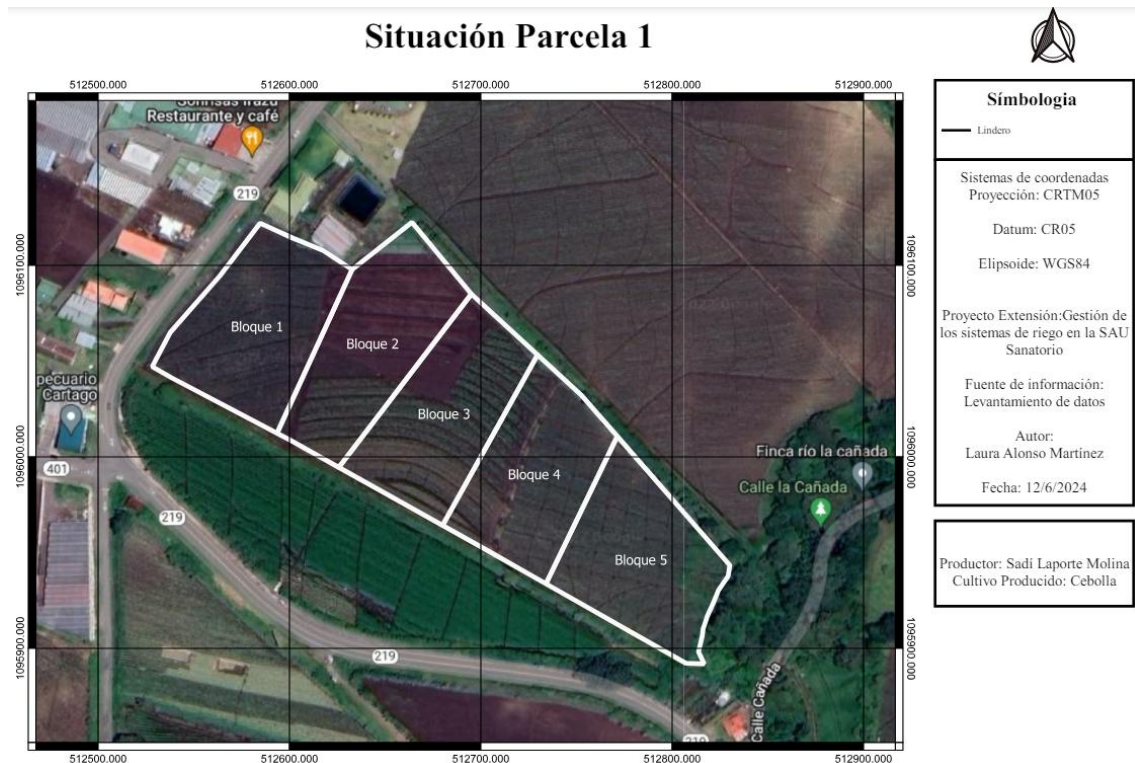


Ilustración 2- Mapa de la zona de estudio

La zona norte de Cartago es una región cuya principal fuente de ingresos es la actividad agropecuaria. Sin embargo, para asegurar su sostenibilidad y desarrollo, es crucial abordar los problemas de financiamiento de la investigación científica, la marginalización de las comunidades rurales en términos de capacitación y la gestión adecuada del uso del suelo. La colaboración entre el INTA, centros educativos y los agricultores locales es fundamental para implementar técnicas agrícolas avanzadas y sostenibles, mejorar la calidad de los productos y proteger el medio ambiente. Solo a través de estos esfuerzos coordinados se podrá garantizar un futuro próspero para la agricultura en la zona norte de Cartago.

- 7.1. Tratamiento de la información

La información espacial recolectada en el campo se obtuvo en estudios anteriores mediante diversos formatos reconocidos en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo la edición e identificación de características como altura, delimitación de parcelas, texturas del suelo y ubicación geográfica relevante para los temas de interés.

En este proyecto recopiló información espacial utilizando dispositivos RTK, permitiendo la extracción de capas georreferenciadas en los sistemas conocidos en Costa Rica. Posteriormente, se realizaron ediciones en el software QGIS, que destaca por su

capacidad de análisis de datos espaciales y su facilidad para modificar datos según las necesidades del usuario, lo cual fue crucial para generar los productos requeridos.

Antes de obtener la información geoespacial, en proyectos ya finalizados se llevó a cabo un trabajo de campo para recopilar datos en 44 parcelas ubicadas en la Zona Norte de Cartago, cerca del Sanatorio Durán, pertenecientes a la Sociedad de Usuarios del Sanatorio (SUA). Estos terrenos, utilizados para cultivos de cebolla, papa, zanahoria, repollo, fresa y aguacate, fueron analizados comenzando por las parcelas a mayor altitud y terminando en las de más fácil acceso. En cada parcela se tomaron puntos alrededor del lindero y en áreas específicas con diferencias de nivel importantes para el análisis de las curvas de nivel, relevantes para el diseño de sistemas de riego. También se delimitaron reservorios presentes en algunas parcelas.

La toma de información se realizó utilizando tres equipos RTK: GEOMAX, CHC y EMLID. Además, se empleó equipo topográfico de la Escuela de Ingeniería Agrícola, como trípodes, bastones, estacas, mazos, clavos, cintas métricas y los equipos RTK.

En el campo, se instalaron los equipos y se realizaron las modificaciones necesarias para establecer una correcta exactitud y precisión de los datos. Se configuraron los dispositivos en formato "Fix" y se introdujeron las coordenadas geográficas del punto de amarre, las cuales, según el dispositivo RTK, se debieron convertir entre coordenadas cartesianas o geodésicas usando herramientas tecnológicas.

Una vez realizados los levantamientos en cada parcela, se extrajeron los datos de los conectores en formato shape y csv, según el dispositivo y el formato seleccionado.

- 7.1.1. Métodos de tratamiento de la información

- 7.1.1.1. Tipos de datos espaciales

La información recopilada se modificó en QGIS para obtener los datos de interés. A partir de los levantamientos, se generaron capas vectoriales de tipo polígonos y puntos, representando las parcelas en estudio. Se realizaron recortes y modificaciones esenciales para generar nuevas capas y permitir un análisis exhaustivo.

Primero, se editó la capa vectorial "PlanoCatastro_ZonaNorte_Sanatorio_Edit" usando herramientas de edición de capas vectoriales para recortar solo las zonas cultivadas, basándose en los ortomosaicos generados previamente. Se colocaron las capas de las parcelas sobre los ortomosaicos, y se editaron las propiedades de estas capas para dejar los polígonos sin fondo, proporcionando una visión clara de la capa ráster subyacente.

Con una visión clara de las zonas, se editó la capa de planos utilizando la herramienta "Conmutar edición". Se añadieron polígonos para calles, bodegas, galpones y reservorios, clasificando cada elemento y creando una nueva capa. Esto permitió recortar la capa de planos, detallando solo las zonas de cultivos.

Se revisaron los datos en las tablas de los polígonos y se eliminaron los que no eran relevantes para el proyecto. Una vez finalizada la edición de las capas de los polígonos de las parcelas, se guardaron caracterizadas como linderos o parcelas. Luego, se guardaron individualmente para un posterior procesamiento.

Se subieron las capas de puntos a QGIS. Los archivos en formato shape se añadieron con la herramienta “Añadir capa vectorial”, y los archivos en formato csv con “Añadir capa de texto delimitado”, ajustando la tabulación de los datos para asegurar su correcta lectura.

Se modificó la tabla de atributos usando la calculadora de campos para añadir columnas con la fecha y el equipo utilizado en la toma de puntos. Esto permitió una identificación válida del levantamiento realizado, facilitando un buen análisis de la información y ordenando las visitas a la zona de estudio. Cada punto tenía un ID, coordenadas Norte, Este y Elevación, y una descripción para puntos de amarre o zonas de interés.

Finalmente, se usó la herramienta de geoprocésamiento “Unión” para combinar todas las capas de puntos en una sola capa para un mejor análisis. Esta capa de puntos se superpuso a la capa editada de parcelas para identificar posibles vacíos en el levantamiento y comprobar una buena georreferenciación de los datos (Romero Calvo et al. 2023).

- 7.1.1.2. Técnicas de tratamiento geoestadístico

Las capas ráster utilizadas en este proyecto se utilizaron para generar diversas capas vectoriales necesarias para análisis posteriores. Estas capas ráster se crearon a partir de la capa vectorial resultante de la unión de las capas de puntos. Esta capa de puntos fue esencial para crear el Modelo Digital de Elevación (DEM) del cual se derivaron las curvas de nivel de las áreas estudiadas.

Para crear el DEM, se utilizó la herramienta de interpolación TIN, seleccionando la capa vectorial de puntos, el sistema de coordenadas CRTM05 (utilizado en Costa Rica) y el tamaño de píxel deseado. Se estableció un tamaño de píxel de 1 metro, adecuado para el trabajo de riego requerido, asegurando así un correcto funcionamiento del software.

Una vez generado el DEM, se guardó y se procedió a crear las curvas de nivel en QGIS. En la sección de edición de capas ráster, específicamente en la opción de extracción, se seleccionaron las curvas de nivel. Se configuró el intervalo de las curvas a 1 metro, para una adecuada representatividad de los datos de la zona.

- 7.1.1.3. Generación de productos

Después de extraer las capas de linderos y las curvas de nivel, se crearon una serie de mapas temáticos para cada parcela en estudio utilizando el generador de mapas de QGIS. Antes de elaborar los mapas, se verificó la existencia de cada parcela analizada. Con los linderos delimitados, se realizó una intersección entre la capa de texturas del suelo y las curvas de nivel, permitiendo identificar la textura del suelo y las curvas de nivel de

cada parcela. Esta intersección generó nuevas capas que representaban la textura del suelo por parcela y se guardaron individualmente las curvas de nivel para cada una.

Con todas las capas recopiladas, se comenzaron a elaborar los mapas para cada parcela. Estos mapas fueron esenciales para identificar las características del terreno, incluyendo los linderos, la textura del suelo, las curvas de nivel y los cultivos presentes. Cada mapa tenía un título específico correspondiente a la parcela en estudio. Luego, se extrajeron todos los mapas con las características individuales de cada parcela para facilitar su identificación y caracterización.

Estos productos fueron fundamentales tanto para el diseño de siembra como para proporcionar los datos topográficos y geoespaciales necesarios para el diseño del sistema de riego (Romero Calvo et al. 2023).

Posteriormente, después de analizar el mapa con las curvas de nivel y tras una visita a la parcela, se decidió por este diseño de riego, acorde a la orografía de la parcela y la situación de la balsa de riego. El agricultor realizó la siembra según este diseño de riego y en dirección perpendicular a la pendiente, con el objetivo de evitar la pérdida de suelo.

- 7.2. Caracterización de las unidades de producción

Este proyecto se divide en varios componentes fundamentales. Primero, se hubo realizado una caracterización detallada de cada unidad de producción, usando el programa informático QGIS teniendo en cuenta datos espaciales como el cultivo, tipo de suelo y topografía. Segundo, se llevará a cabo una caracterización de la demanda hídrica, teniendo en cuenta los requerimientos específicos de agua y las particularidades de cada parcela. Posteriormente, se diseñarán sistemas de riego eficientes adaptados a las necesidades individuales de cada parcela.

Estudios anteriores basados en la automatización de los sistemas de riego en la zona del Sanatorio Durán, realizaron los análisis de suelo pertinentes, con el objetivo de caracterizar cada unidad de producción.



Ilustración 3- Muestras de suelo de la parcela modelo

En la *ilustración 10* se muestra con detalle el sensor de humedad relativa, temperatura y humedad del suelo que se llevó a la parcela modelo, para obtener los datos reales sobre el estado de humedad del suelo y trabajar con ello.



Ilustración 4- Estación total con el sensor de humedad y temperatura

- **7.3. Diseño de siembra**

En este proyecto, fue esencial diseñar una base de siembra, ya que no es posible planificar un sistema de riego sin conocer la forma, orientación y dimensiones de las camas de siembra. Este diseño se basó en el estudio topográfico, estableciendo una distribución en contorno. Esto implicó colocar las camas de siembra paralelas a las curvas de nivel del terreno, con dos líneas de emisores de riego siguiendo la misma orientación que las camas.

- **7.4. Diseño de riego**

- **7.4.1. Diseño agronómico**

a. Lámina neta

Ecuación 1.

$$Ln = \frac{CC-PMP}{100} * Pe * Prof * Ap$$

Donde;

Ln: Lámina Neta

PMP: Punto de Marchitez Permanente

Pe: Peso específico del suelo

Prof: Profundidad de las raíces

Ap: Agotamiento permisible

Para el diseño se analizarán diversos escenarios, asegurando que el agotamiento permisible se mantenga entre el 20% y el 40%. Esto permitirá aprovechar las ventajas del riego de alta frecuencia, manteniendo el cultivo cerca de los niveles óptimos de humedad y evitando el estrés hídrico.

b. Eficiencia de riego

La eficiencia de riego varía según el sistema de riego a utilizar, para un sistema de riego por goteo se estima una eficiencia del 90 al 95%.

c. Lámina bruta

Se determinó utilizando la ecuación 2, con datos ya calculados.

$$L_b = \frac{L_n}{E_f}$$

d. Frecuencia de riego

Se determinó utilizando la ecuación 3, que incorpora la lámina neta y la evapotranspiración real. Como no es práctico tener una frecuencia de riego en decimales, se redondeó hacia abajo. Luego, se recalculó la lámina neta con esta nueva frecuencia usando la ecuación 3 y finalmente, se determinó la lámina bruta nuevamente mediante la ecuación 2 con la lámina neta recalculada.

$$F_r = \frac{L_n}{ET_o}$$

- 7.4.2. Diseño asistido por software

Para diseñar los sistemas de riego se utilizó el software Irricad V10. Primero, se importaron las cintas de goteo, colocándolas en grupos de tres por cama en contorno. Posteriormente se configuraron según las necesidades hídricas del cultivo, la textura del suelo y las condiciones climáticas. Se importaron las curvas de nivel de la parcela, obtenidas tras el tratamiento de la información topográfica del terreno.

Con estos parámetros, se trazaron las tuberías laterales para optimizar la cobertura de las cintas de goteo. A cada tubería lateral se le asignó una válvula de control para separar las zonas. Luego, se trazó la tubería principal con el suministro de agua, colocando la válvula según la ubicación real de las tomas de cada parcela. Las zonas se asignaron con un caudal determinado, asegurando que fuera menor al máximo permitido para cada zona.

Se seleccionaron parámetros de diseño, estableciendo 2 m/s como la velocidad máxima en las zonas y en la tubería principal. Se verificó que todos los elementos estuvieran conectados y se diseñaron las tuberías laterales según la velocidad permisible. Se comprobó que los valores de presión en las válvulas y los emisores estuvieran dentro

de los rangos aceptados, y que el caudal en las válvulas fuera adecuado. (Romero Calvo et al. 2023).

El diseño de la tubería principal se realizó de manera similar a las tuberías laterales. Se verificaron los diámetros y materiales de las tuberías, realizando cambios si era necesario y analizando los parámetros con las modificaciones. Al finalizar el modelado y diseño asistido, se aseguró que las velocidades y presiones estuvieran dentro de los rangos permitidos para garantizar el caudal necesario para las parcelas.

Finalmente, se generaron reportes de mapas de presiones mínimas y máximas en las parcelas, así como reportes de la cantidad de tubería, cintas de goteo y válvulas con sus especificaciones. Estos diseños y reportes se utilizaron para crear los planos de cada parcela.

- 7.5. Gestión y monitoreo del riego agrícola

- 7.5.1. Instrumentación para la toma de datos

El objetivo principal del proyecto es mejorar la producción y el uso de los recursos escasos como es el agua mediante el monitoreo de la temperatura y humedad del ambiente y la humedad del suelo. Para obtener así el máximo número de variables climáticas que afectan al cultivo directamente, y garantizar un buen rendimiento de la producción.

- 7.5.1.1. Sensor de humedad relativa

En el estudio se contó con un sensor capacitivo de humedad acompañado de un termistor para medir el aire circundante en el ambiente, este muestra los datos a través de un software como *Arduino* y este envía la información a una página web. El sensor envía datos cada 2 segundos (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN, 2022).

Este sensor monitorea la cantidad de vapor de agua en el aire, es decir, la evaporación y transpiración de las plantas, lo que nos da información sobre en qué momento la planta puede sufrir un estrés.

- 7.5.1.2. Sensor de temperatura

Un sensor de temperatura es un dispositivo que percibe cambios en la temperatura del aire o del agua y los convierte en una señal eléctrica que se transmite a un sistema electrónico (Saldías, 2023). Este sensor consta de tres partes principales: un elemento sensor, una vaina de material conductor en su interior y un cable que lo conecta al sistema electrónico.

El sensor aporta información sobre el microclima típico de cada parcela o zona agrícola, pudiendo así adaptar al máximo el riego de cada productor.

- 7.5.1.3. Sensor de humedad en el suelo

El sensor de humedad del suelo mide la humedad existente en el suelo por medio de 2 electrodos resistivos insertados a unos 5 cm de la superficie. El sensor mide la humedad mediante la resistencia entre ambos electrodos, es decir, si el suelo se encuentra con un nivel muy elevado de humedad la resistencia será muy baja (corto circuito), en el caso contrario de baja humedad, la resistencia será muy alta (circuito abierto) (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN, 2022).

Este sensor evalúa la constante dieléctrica del suelo gracias al uso de un capacitor (Enciso et al. 2008). La información obtenida con este sensor es el contenido volumétrico de agua en el suelo y varía con la profundidad. Los valores normales de agua en un suelo utilizado para la agricultura están entre 0 y 0,4 m³ de agua en cada m³ de suelo.

- 7.5.2. Análisis de la información

Para la integración de todos los datos de los sensores se recopilan y se integran en una plataforma centralizada.

En cuanto a modelado y simulación, se utilizan modelos matemáticos para simular el comportamiento del suelo y las plantas bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad. Estos modelos ayudan a prever las necesidades hídricas futuras.

Se implementarán algoritmos que analizan los datos en tiempo real y proporcionan recomendaciones sobre cuándo y cuánto regar.

En la *ilustración 5* podemos ver la variación de humedad durante un periodo de una hora en una planta “ensayo”. Durante este tiempo concreto la humedad del suelo se encuentra entre el 18 – 19%, es decir, la planta necesita un riego próximo. Como podemos ver en la *ilustración 7*, la gráfica se encuentra en zona amarilla, por lo que el programa que visualizará el agricultor, está indicando la necesidad de un riego próximo.

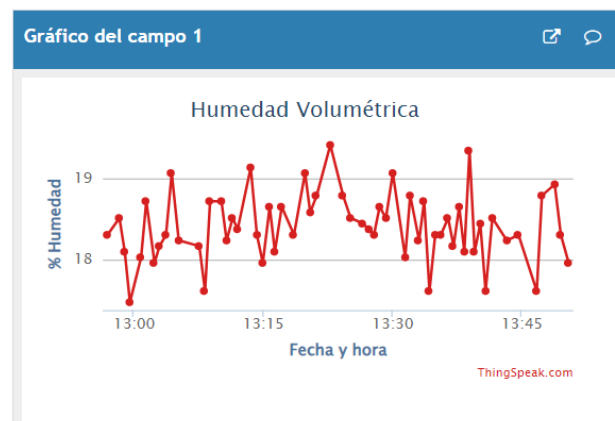


Ilustración 5- Gráfico de variación de la humedad en el tiempo

En la *ilustración 6* se muestra la variación de humedad durante un periodo de una hora en otra planta “ensayo”. Durante este tiempo concreto la humedad del suelo se encuentra entre el 32 – 34%, es decir, la planta se encuentra en un estado de humedad óptimo. Como podemos ver en la *ilustración 8*, la gráfica se encuentra en zona verde, por lo que el programa que visualizará el agricultor, está indicando el estado óptimo de humedad en el suelo para el cultivo. Por lo que en ese momento concreto no es necesario ningún riego, pero puede que empiece a ser necesario horas después.

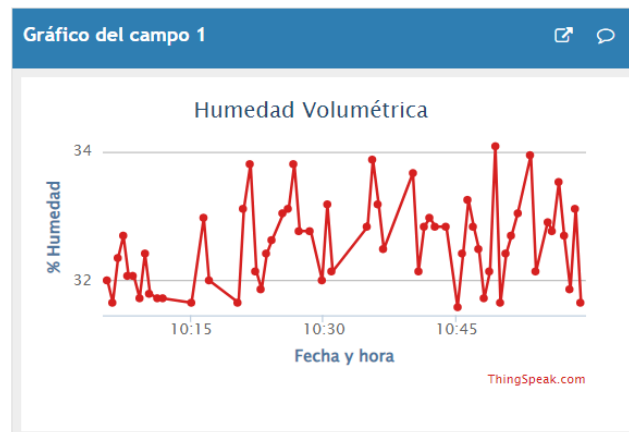


Ilustración 6- Gráfico de variación de la humedad en el tiempo

Por último para la visualización de los datos, estos se presentan a través de interfaces gráficas que mediante un software, este se puede transformar a un gráfico circular y por colores. Con el objetivo de permitir al productor ver fácilmente las condiciones actuales y las recomendaciones de riego mediante un código de color (verde: humedad adecuada, rojo: sequía extrema y amarillo: riego próximo). Como se puede observar en las siguientes imágenes, en el caso de la *ilustración 7* el suelo requiere de un riego actual, mientras que en la *ilustración 8*, el estado de humedad del suelo es adecuado para la planta.

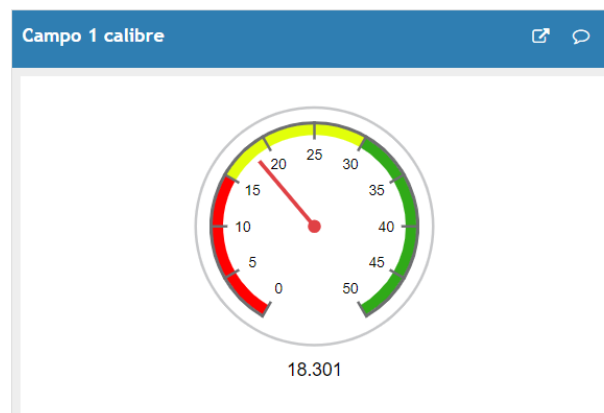


Ilustración 7- Gráfico de humedad por colores

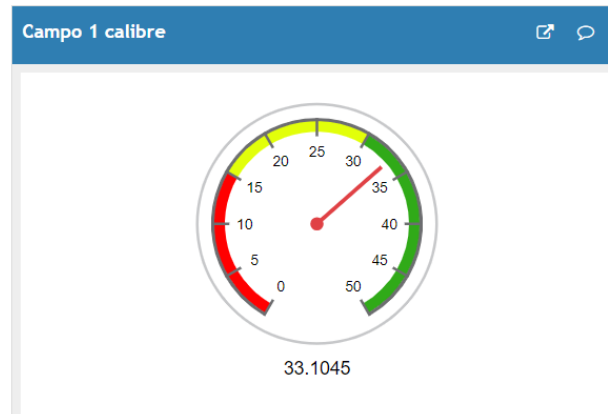


Ilustración 8- Gráfico de humedad por colores

La optimización del riego se ha basado en el análisis de datos para activar el riego sólo cuando es necesario y en cantidades óptimas, evitando así el desperdicio de agua. Además, permite realizar ajustes en tiempo real al detectar cambios en las condiciones climáticas o del suelo, garantizando un uso eficiente y preciso del agua.

El análisis de datos en el riego agrícola ofrece varios beneficios: ha permitido ahorrar agua al ajustar el riego a las necesidades exactas de las plantas, ha mejorado el rendimiento de los cultivos al proporcionar la cantidad adecuada de agua, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola al reducir el impacto ambiental, y disminuyendo los costos operativos mediante un menor consumo de energía y recursos.

El correcto uso de este modelo ha permitido conocer las características que influyen en el contenido de humedad de cada unidad de riego, estableciendo un sistema de medición y gestión de estas características, definiendo indicadores para un balance hídrico y validando el modelo mediante parcelas experimentales.

Finalmente, se ha generado una metodología que los productores podrán utilizar para implementar y gestionar eficientemente el riego en sus parcelas.

En una parcela agrícola, los sensores podrían detectar que la humedad del suelo es baja pero la humedad relativa es alta y la temperatura es moderada. El sistema podría entonces recomendar un riego ligero, ajustando el volumen de agua para evitar el exceso. Si se espera una lluvia, el sistema podría retrasar el riego para aprovechar el agua de lluvia. Contribuyendo así al ahorro de agua.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo sobre el trabajo llevado a cabo para lograr que la labor de riego sea independiente y ajustar la dosis de riego automáticamente según el estado de la planta, las características de humedad del suelo, humedad del ambiente y posibles precipitaciones.

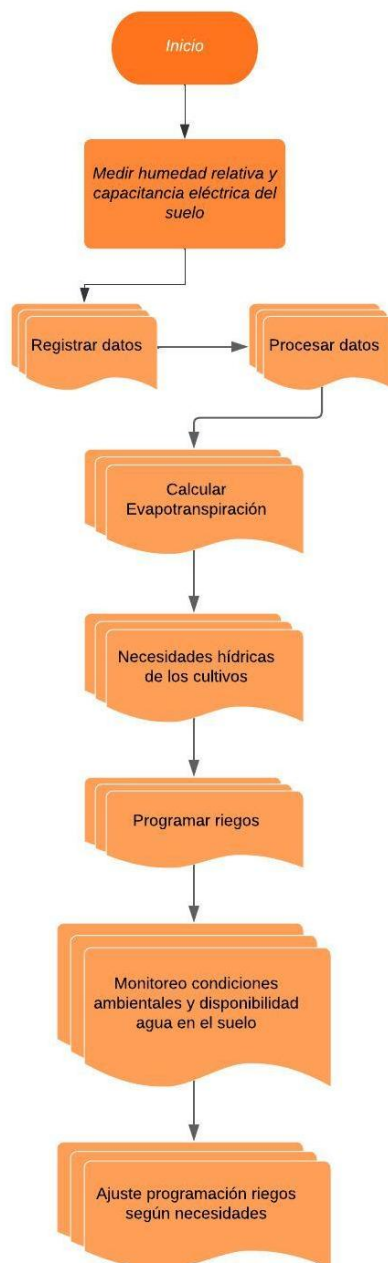


Ilustración 9- Diagrama de flujo

- 8- Resultados del proyecto

- 8.1. Altimetría y tipos de suelo de la parcela modelo

La zona en estudio, caracterizada por su altitud elevada y pendientes pronunciadas, presenta un suelo franco-arenoso de origen volcánico, lo cual influye significativamente en

su morfología y en las posibles actividades humanas para obtener un rendimiento económico.

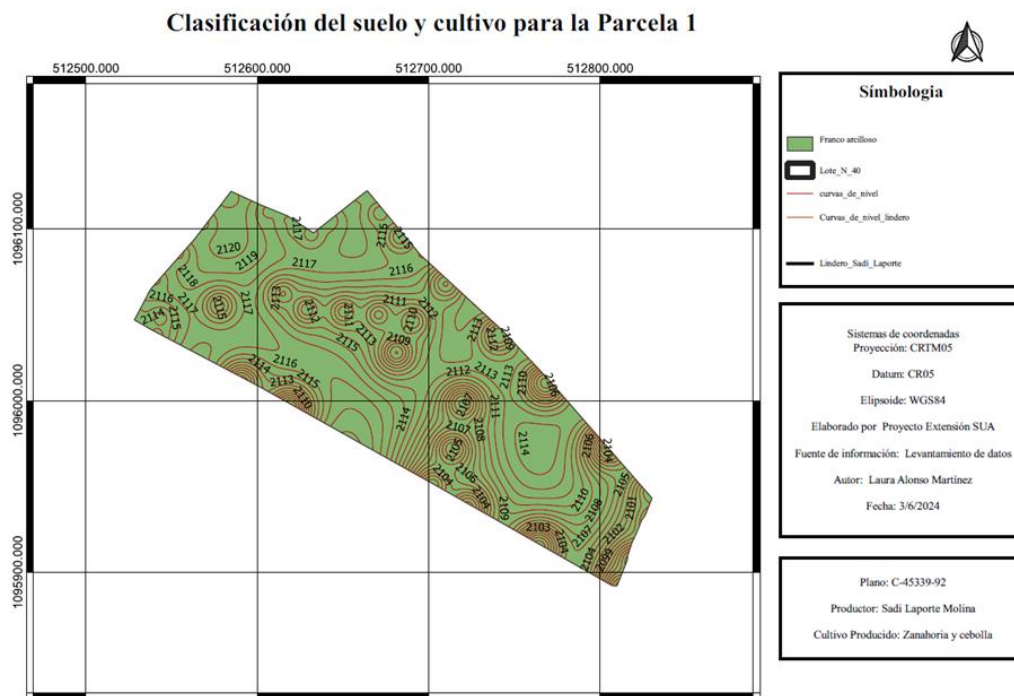


Ilustración 10- Mapa clasificación del suelo y curvas de nivel

El suelo franco-arenoso, compuesto por una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla, ofrece una buena estructura para el establecimiento de cultivos hortícolas, posee una gran fertilidad agrícola gracias a su textura; dado que facilita tanto el drenaje como la retención de nutrientes y humedad. Las pendientes pronunciadas influenciaron a un diseño de riego que aprovechara al máximo la distribución del área y de forma paralela al sentido de las curvas de nivel, además del uso de emisores autocompensados para contribuir a la uniformidad de la entrega de caudal de los mismos.

- 8.2. Diseño de riego de precisión para la parcela de estudio

- 8.2.1. Diseño agronómico

En el cuadro 1 se muestran los resultados del diseño agronómico del suelo de la parcela modelo tras el riego.

Tabla 1- Datos del riego

CC	18	%
PMP	8	%

Máxima lámina de retención del suelo	4.355	mm
Eficiencia del método de riego	90	%
Lámina de riego a aplicar	9.17	mm
Evapotranspiración de referencia	4.355	mm/día
Frecuencia de riego	2	día

La capacidad de campo de este suelo es del 18%, lo que significa que el suelo puede retener el 18% de su peso en agua tras el riego, después de que el exceso de agua haya drenado. Esta es la cantidad de agua disponible para las plantas. Esta medida es crucial para la gestión del riego y el mantenimiento de la salud de los cultivos, ya que asegura que las plantas tienen acceso a una cantidad adecuada de agua sin llegar a condiciones de saturación que podrían afectar negativamente sus raíces.

El punto de marchitez permanente de un suelo agrícola es el contenido de humedad del suelo en el cual las plantas no pueden extraer suficiente agua para mantener su turgencia y, por lo tanto, comienzan a marchitarse irreversiblemente. Este punto marca el límite inferior del contenido de agua en el suelo que las plantas pueden utilizar, en este caso es del 8%. Por lo que cuando el contenido de agua en el suelo desciende al 8% de su peso seco, las plantas ya no pueden extraer suficiente agua para sus necesidades fisiológicas y comienzan a marchitarse de manera permanente.

Conocer el punto de marchitez permanente es esencial para la gestión del riego, ya que permite establecer un umbral crítico que no debe ser alcanzado para evitar el estrés hídrico en las plantas y garantizar su salud y productividad óptima.

La máxima lámina de retención del suelo es la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en la zona radicular del suelo, es la cantidad de agua que el suelo puede retener antes de llegar al PMP. Esto nos permite planificar los riegos, evitando excesos y pérdidas por drenaje. El objetivo es aplicar la cantidad justa para mantener un nivel de humedad adecuado en el suelo.

Los resultados mostrados anteriormente son beneficiosos para el productor, ya que la frecuencia de riego se establece cada dos días, lo cual permite tener una buena capacidad de respuesta en el momento de monitorear el riego.

- 8.2.2. Diseño hidráulico

Como ya se mencionó, principalmente el relieve y el tipo de suelo condicionó al diseño de un sistema de riego de precisión de alta eficiencia, con el fin de que se pueda realizar un riego localizado, maximizando el uso del agua y generando un mejor control de operación de este. Además, el mismo permitió subdividir el terreno en 5 bloques

estratégicos para el manejo de la presión del sistema y del aprovechamiento del caudal disponible.

Tabla 2- Disposición en campo y operación del sistema

Bloque	Área (ha)	Caudal por válvula (l/s)	Presión de entrada (mca)
1	0.61	8.48	26.80
2	0.60	8.34	30.30
3	0.58	8.37	29.60
4	0.56	8.00	27.00
5	0.60	8.40	31.00

La tabla anterior muestra los diferentes caudales y la presión en cada válvula de control, esto depende de la distancia desde la balsa a los hidrantes y de la diferencia de altura.

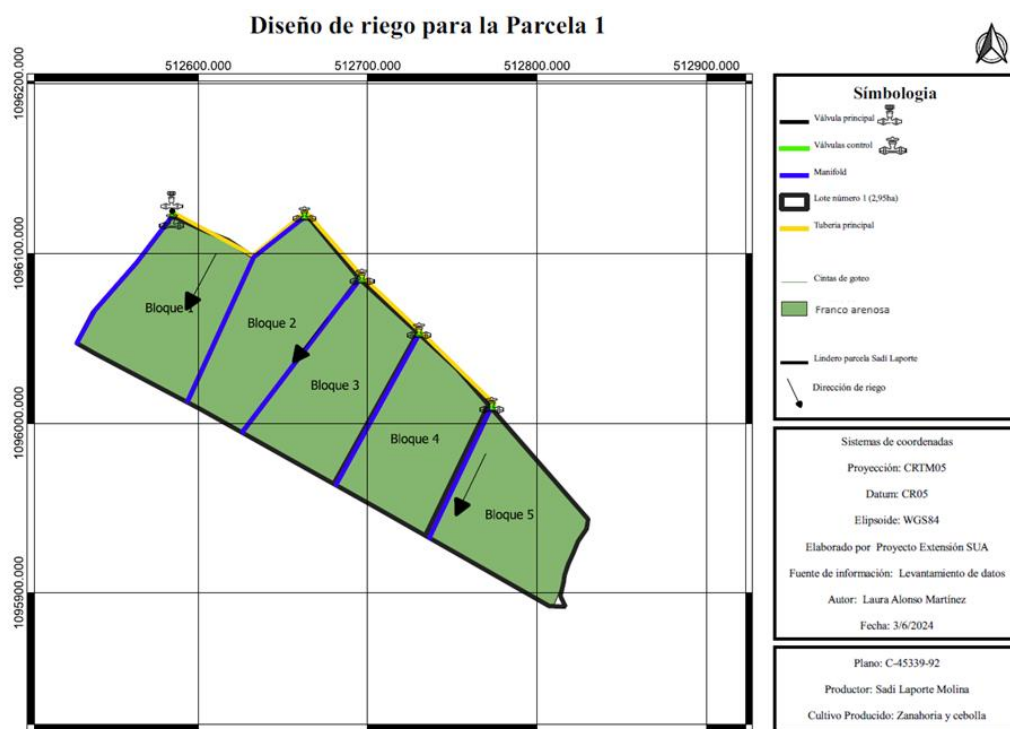


Ilustración 11- Mapa diseño de riego en la parcela

Propuesta de modelo de monitoreo y gestión

Con la propuesta de riego mostrada en la imagen anterior ahora es posible aplicar las bases del sistema de monitoreo, ya que es posible ubicar los valores de humedad volumétrica en los que se debe mantener el suelo para esta zona y tipo de riego.

Tabla 3- Valores de humedad de suelo que se pueden monitorear con el medidor de humedad

Textura	Agua en el suelo	
	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente
Arenoso	9%	7%
Arenoso franco	14%	10%
Franco arenoso	18%	8%
Franco	34%	22%
Franco arcilloso	30%	16%
Arcilloso	44%	24%

En el caso de la parcela del agricultor modelo, se determinó un suelo “franco arenoso”. En este caso se recomienda aportar riegos frecuentes para mantener el suelo en la capacidad de campo, pero sin sobrepasarla. Evitando bajar del 18%, para no llegar al punto de marchitez permanente, ya que esto no tendría retorno y la planta moriría. El riego ideal sería aquel en que toda el agua aportada fuera utilizada por las plantas (Laboratorio, 2020).

Los datos recopilados muestran que al aplicar la programación del riego con sensores de humedad, se logra una eficiencia en la reducción en el uso de recursos líquidos. De esta manera las plantas disponen del agua necesaria para su crecimiento óptimo sin llegar a condiciones de estrés hídrico. Además, al mantener la humedad del suelo dentro de los parámetros ideales, se maximiza la absorción de agua por las raíces, reduciendo significativamente las pérdidas por evaporación y drenaje profundo. En consecuencia, se observa una notable reducción en el uso del agua, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y conservando este valioso recurso, esencial para enfrentar los desafíos ambientales y de disponibilidad hídrica en el futuro.

- 9- Conclusiones

La gestión y monitoreo del riego agrícola son fundamentales para garantizar un uso eficiente del agua y maximizar la productividad de los cultivos.

Lo primero para implementar un sistema de riego es realizar una planificación detallada que tenga en cuenta las necesidades hídricas de los cultivos, el tipo de suelo, el clima, las características del terreno y el cultivo, es decir, caracterizar la demanda hídrica del cultivo.

El sistema de monitoreo de humedad y temperatura por parte de los sensores, debe ser intuitivo y fácil de utilizar para los productores, estableciendo el gráfico por colores, cualquier agricultor u operario debe saber cuándo y cuánto regar, evitando el exceso o la escasez de riego.

En cuanto a la automatización del riego a través de sistemas de control, esto nos permite programar y ajustar la cantidad y frecuencia de riego de manera precisa. Así se promueve el buen uso de los recursos hídricos y colabora con evitar el desperdicio de agua, garantizando que los cultivos reciban la cantidad justa de agua en el momento adecuado.

También es importante controlar las pérdidas de agua durante el proceso de riego. Esto incluye la reparación de fugas en los sistemas de riego y la implementación de técnicas para reducir la evaporación, como el mulching o la cobertura del suelo.

Al implementar prácticas y tecnologías de gestión y monitoreo del riego agrícola, los agricultores pueden optimizar el uso del agua, reducir los costos de producción y mejorar la salud y el rendimiento de los cultivos.

- 10- Recomendaciones

En relación al monitoreo del consumo de agua, es importante llevar un registro del consumo de agua en los cultivos para evaluar la eficiencia del riego y realizar ajustes si es necesario. Esto se puede hacer mediante la instalación de medidores de agua en los sistemas de riego.

La recomendación técnica es establecer un programa de riego que se ajuste a las características específicas del suelo y las necesidades del cultivo. Aplicar riego cada 2 días garantiza que el suelo se mantenga en un rango de humedad óptimo, evitando tanto el exceso de saturación como el déficit hídrico.

Se sugiere utilizar métodos de riego de alta eficiencia, como el riego por goteo, que minimizan las pérdidas por evaporación y escorrentía, asegurando que el agua se distribuya de manera uniforme y llegue directamente a la zona radicular. Además, con un monitoreo constante de la humedad del suelo mediante sensores, ajustando las frecuencias y cantidades de riego en función de las condiciones climáticas y el estado fenológico del cultivo. Integrar prácticas de manejo sostenible, como la cobertura del suelo o mulching o el uso de cultivos de cobertura, puede ayudar a conservar la humedad y mejorar la estructura del suelo.

Estas medidas no solo contribuyen a la reducción del uso del agua, sino que también promueven la salud del suelo, incrementan la eficiencia del riego y aseguran una producción agrícola sostenible y rentable a largo plazo.

- 11- Bibliografía

Agua regenerada en agricultura: una solución real y sostenible para combatir la escasez hídrica. (s. f.). <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Agua-regenerada-en-agricultura-una-soluci%C3%B3n-real-y-sostenible-para-combatir-la-escasez-h%C3%ADrica.aspx>

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). "Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements." FAO Irrigation and Drainage Paper 56. <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

Alvarado, A., & Navarro, J. (2005). Desarrollo, investigación y agricultura en Costa Rica. Agronomía Costarricense, 29(3). <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6791>

Alvarado, J. & Navarro, M. (2005). *El Desafío de la Innovación en la Agricultura*. Editorial Universitaria.

Araya Umaña. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria INTA Manual de Recomendaciones para el cultivo de cebolla (Allium cepa L.). (2012). <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10393.PDF>

Balafoutis, AT, et al. (2017) Tecnologías agrícolas inteligentes: descripción, taxonomía e impacto económico". Agricultura de precisión. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9486-2>

Basualdo A. (2015) Manual de buenas prácticas para la generación, el almacenamiento y la difusión de informática climática en instituciones y organismos del MERCOSUR. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/2549/BVE17038646e.pdf;jsessionid=9E3E0F4F5BC846BB618F39A45E362CA9?sequence=1>

CRS Laboratorio. (2020, 9 noviembre). Riego II: las propiedades hídricas del suelo. <https://csrlaboratorio.es/laboratorio/aguas/aguas-de-riego/riego-ii-las-propiedades-hidricas-del-suelo/>

Cubero, J. (1994). *Impacto Ambiental de la Agricultura Convencional en Costa Rica*. Revista de Ciencias Ambientales.

Díaz Espinoza. (2022, 1 septiembre). Aproximación multimetodológica para el cálculo de la huella hídrica en cultivos de cebolla, Tierra Blanca, Cartago. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/14394/TF9575_BIB310115_Melany_Diaz_Espinoza%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Elizondo Alvarado (2015). INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA- COSTA RICA). (2015). SUELOS DE COSTA RICA ORDEN INCEPTISOL BOLETÍN TÉCNICO - 5 -. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1825.PDF>

Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). "Methods and Technologies to Improve Efficiency of Water Use." Water Resources Research. <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>

FAO. (2012). "Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security". FAO Water Reports 38

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e41cd021-c43a-460b-839e-c1abf8bd3f06/content>

Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). "Temperature extremes: Effect on plant growth and development." Weather and Climate Extremes. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

Ibáñez Asensio, Gisbert Blanquer, Moreno Ramón, & Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, UPV. (2011). INCEPTISOLES. <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12884/inceptisoles.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (s. f.). Cuenca Río Reventazón: Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica. <http://cgloba.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EstudioCuencas/EstudioCuencas-cuencaRioReventazon.pdf>

Instituto Meteorológico Nacional. (2015). EL CLIMA Y LAS REGIONES CLIMÁTICAS de COSTA RICA. En CLIMA EN COSTA RICA. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/cb3b55c3-f358-495a-b66c-90e677e35f57>

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2017). MANUAL DEL CULTIVO DE PAPA EN COSTA RICA (Solanum tuberosum L.). <https://www.maq.go.cr/bibliotecavirtual/f01-10931.pdf>

Jaramillo Pérez y Pulgarrin Giraldo. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN. (2022). DISEÑO DE DISPOSITIVO DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE VARIABLES CLIMÁTICAS Y HUMEDAD DEL SUELO EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/1a7b3da7-53db-442c-8888-d3fdb32e72dd/content>

Jones, H. G. (2013). "Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology." Cambridge University Press.

Jones, H. G. (2004). "Irrigation Scheduling: Advantages and Pitfalls of Plant-Based Methods." Journal of Experimental Botany. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>

Muñoz-Carpena, R., & Dukes, M. D. (2005). "Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops." Transactions of the ASAE. <https://doi.org/10.13031/2013.18506>

Netafim. Riego por aspersión. (s. f.). <https://www.netafim.co.cr/riego-por-aspersion/>

Peralta A y Simpfendorfer L. Instituto de Investigaciones Agropecuarias Centro Regional de Investigación Carillanca. (2001). RIEGO POR ASPERSIÓN. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/40180/NR26419.pdf?sequence=1>

Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). "Improved Indicators of Water Use Performance and Productivity for Sustainable Water Management in Agriculture." Irrigation and Drainage. <https://doi.org/10.1002/ird.700>

Ramírez, L., Alvarado, A., Pujol, R., MacHugh, A., & Brenes, L. G. (2008, 19 febrero). Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6758>

Romero Calvo, Solorzano Quintana. Instituto Tecnológico de Costa Rica Vicerrectoría de Investigación y Extensión. (2023). Propuesta de modelo de automatización de los sistemas de riego mediante aplicación de técnicas de agricultura de precisión para los productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/14445/PI45_BIB310669_Propuesta_de_modelo....pdf?sequence=1&isAllowed=y

Salazar y Hernández (2021). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) Ministerio de Agricultura. Capítulo 4. Respuesta a estrés hídrico controlado del pimiento durante la maduración del fruto. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6647/NR40854.pdf?sequence=9&isAllowed=y>

Saldias, A. (2023, 21 septiembre). Tipos de sensores de temperatura. SRC - Sistemas de Regulación y Control. <https://srcsl.com/tipos-sensores-temperatura/#:~:text=Un%20sensor%20de%20temperatura%20es,la%20regulaci%C3%B3n%20de%20la%20temperatura.>

Senara. (s. f.). Riego. <https://www.senara.go.cr/proyectos/riego.aspx>

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). "Crop Yield Response to Water." Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e00.htm>

Universidad de Costa Rica. (s. f.). Conocer los requerimientos exactos de agua y nutrientes. <http://www.buenaspracticasadagricolas.ucr.ac.cr/index.php/manejo-de-cultivos/conocer-los-requerimientos-exactos-de-agua-y-nutrientes>

UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA. (2015). SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO TIPO SONDA CON SISTEMA DE MONITOREO PARA APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN. Repositorio Unillanos. <https://repositorio.unillanos.edu.co/server/api/core/bitstreams/7b08af2f-cba2-4c53-ab20-568fbb219824/content>

Yara. (2024, 22 marzo). Producir más, con menos: Eficiencia del uso de agua en riego. <https://www.yara.cr/noticias-y-eventos/noticias/producir-mas-con-menos-eficiencia-del-uso-de-agua-en-riego/>

Nombre y firma de la persona coordinadora del proyecto