

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

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.

Eje estratégico:
Agua y Alimentos

Coordinador:
Ing. Kerin Romero Calvo

Colaboradores:
Ing. Milton Solorzano Quintana

Marzo, 2023

1.	Tabla de contenido	
2.	Código y Título del proyecto	1
3.	Autores y direcciones:	1
4.	Resumen.....	1
5.	Abstract	2
6.	Palabras clave y key words	2
7.	Contextualización del proyecto	3
8.	Estrategia de abordaje	4
9.	Análisis de resultados.....	5
9.1	Resultados obtenidos.....	5
12.	Cumplimiento del plan de difusión	8
14.	Limitaciones y problemas encontrados	9
15.	Observaciones generales y recomendaciones.....	9
16.	Agradecimientos.....	10
17.	Referencias.....	10
18.	Apéndices.....	11
	APENDICE 1. Estado del arte y marco referencial del abordaje del proyecto	11
1.1.	Cultivos desarrollados en la zona.....	13
1.1.1.	Papa.....	13
1.1.2.	Cebolla	14
1.1.3.	Fresa	15
1.1.4.	Zanahoria.....	16
1.1.5.	Repollo	17
1.1.6.	Aguacate.....	18
1.1.7.	Kc de los cultivos	19
1.2.	Relación Cultivo, Textura, Clima y Humedad	19
1.2.1.	Textura	19
1.2.2.	Evapotranspiración.....	21
1.2.3.	Humedad En El Suelo	21
1.2.4.	Déficit Permitido En El Manejo Del Riego.....	22
1.2.5.	Métodos Para Medir La Humedad En El Suelo	22
1.3.	Diseños De Campo.....	23

1.3.1.	Dispositivos RTK.....	23
1.3.2.	Tratamiento De La Información.....	26
1.3.3.	Métodos Del Tratamiento De La Información Espacial (SIG).....	27
1.4.	Diseño Del Sistema De Riego.....	29
1.4.1.	Diseño Agronómico	29
1.4.2.	Diseño Hidráulico	30
1.4.3.	Diseño Asistido por Software.....	31
1.5.	Métodos De Riego.....	31
1.5.1.	Riego por goteo.....	32
APENDICE 2. Metodología de abordaje del proyecto		37
1.6.	Tratamiento De La Información.....	37
1.6.1.	Métodos Del Tratamiento De La Información Espacial.....	38
1.7.	Diseño De Siembra.....	40
1.8.	Diseño De Riego	41
1.8.1.	Diseño Agronómico	41
1.8.2.	Diseño Asistido por Software.....	42
APENDICE 3. Caracterización de las unidades de producción		43
APENDICE 4. Caracterización de la demanda hídrica		62
APENDICE 5. Diseño de sistemas de riego eficiente.....		67
APENDICE 6. Interpretación de la humedad en el suelo mediante sensores de humedad		86
APENDICE 7. Taller gestión del agua.....		86

2. Código y Título del proyecto

1421021 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.

3. Autores y direcciones:

Ing. Kerin Romero Calvo (Coordinador)
Escuela de Ingeniería Agrícola del ITCR
Correo electrónico: kromero@itcr.ac.cr
Período de ejecución: del 01 de julio al 31 de diciembre del 2022

Ing. Milton Solorzano Quintana
Escuela de Ingeniería Agrícola del ITCR
Correo electrónico: msolorzano@itcr.ac.cr
Período de ejecución: del 01 de julio al 31 de diciembre del 2022

4. Resumen

La Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, corresponde a un grupo de productores hortícolas que se desarrollan dentro de la zona Norte de Cartago, la cual se destaca por poseer suelos muy fértiles y con gran capacidad de drenaje, en los cuales se desarrollan primariamente cultivos como papa, zanahoria, cebolla y fresa en una extensión de 39.83 ha para 42 unidades de manejo.

Dichos cultivos al encontrarse en estas beneficiosas condiciones de suelo hacen que expresen al máximo su potencial en el uso adecuado agua, y en materia de riego es un área que tiene gran oportunidad de mejora para la gestión de los productores. Esta necesidad evidenciada es la que permitirá poder crear e implementar una herramienta de gestión que les ayude en la gestión del recurso para que sus cultivos expresen los mejores rendimientos.

Por lo tanto, se abordó a través de la integración de información de cada una de las unidades de manejo, para establecer sistemas de riego específico en cada campo y con esto establecer los parámetros de automatización para la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán.

5. Abstract

The Water Users Society (SUA) of the Sanatorio Durán project consist of a group of horticultural producers who operate within the northern zone of Cartago, which stands out for having very fertile soils with great drainage capacity, where crops such as potatoes, carrots, onions and strawberries are developed on an area of 39.83ha consisting of 42 management units.

These crops, being in such beneficial soil conditions, express their maximum potential with the proper use of water, and on irrigation terms, it is an area with great opportunity for the producers' management improvements. This identified need will allow the development and implementation of a management tool to assist them in the management of the resource so that their crops express the best yields.

Therefore, it'll will be addressed through the integration of each of the management units information, to establish specific irrigation systems on each of the parcels and with the objective of establishing the necessary automation parameters to design the water management model through precision irrigation techniques for subsequent implementation in the field through experimental parcels and with this end in Stage III of technological integration and management in the Society of Water Users (SUA) of the Sanatorio Durán project.

6. Palabras clave y key words

Palabras clave: riego de precisión, agricultura de precisión, gestión del agua, sistemas de información geográfica, uso racional del agua.

Keywords: precision irrigation, precision agriculture, water management, geographic information systems, rational water use.

7. Contextualización del proyecto

La Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán es concesionaria de agua para riego, lo cual le da el beneficio de ser usuario del Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). La extensión y ubicación espacial de la misma se encuentra en la Figura 1.

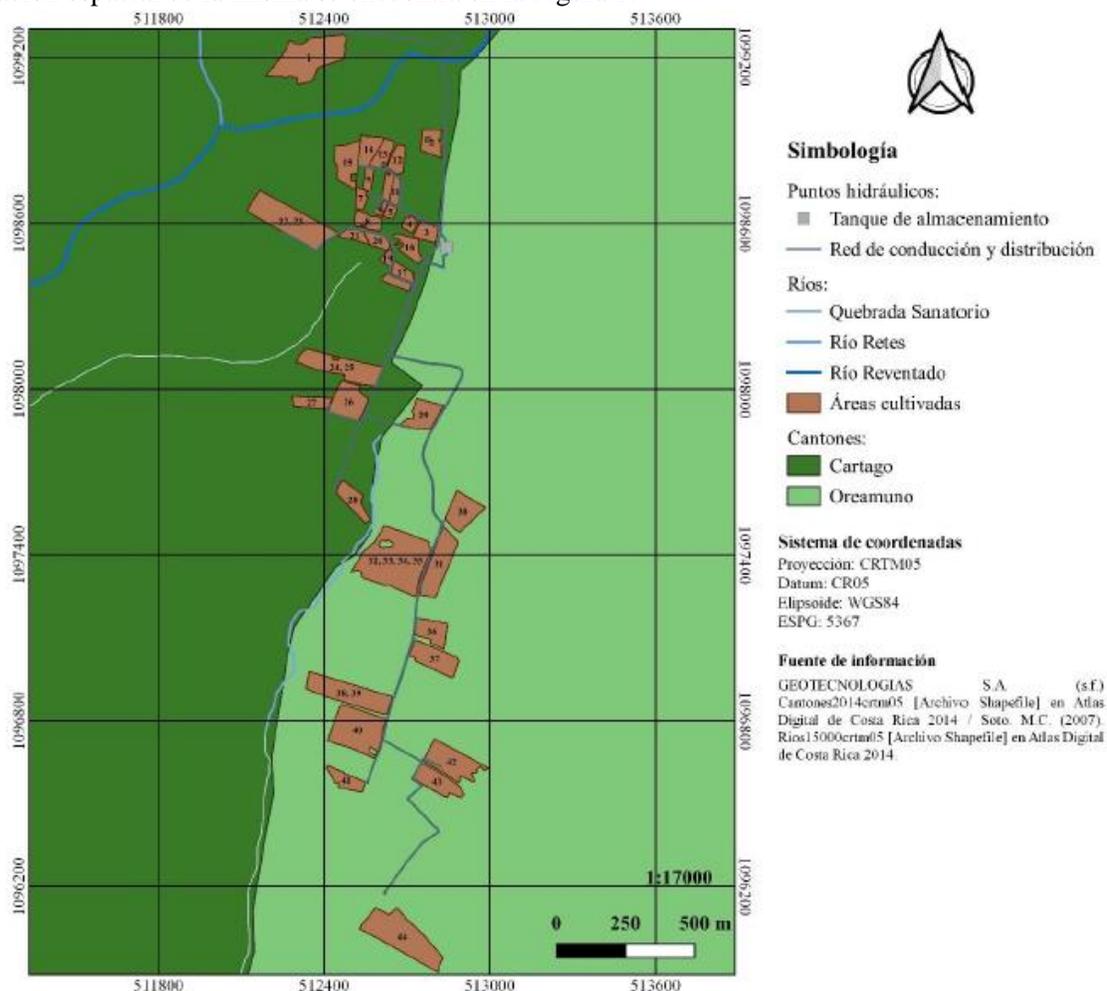


Figura 1: Ubicación geográfica de las áreas cultivadas de la SUA. Fuente: Guzmán-Arias, Solorzano-Quintana y Watson Hernández (2022).

Esta corresponde a un grupo de productores hortícolas que se desarrollan dentro de la zona Norte de Cartago, la cual se destaca por poseer suelos muy fértiles y con gran capacidad de drenaje, en los cuales se desarrollan primariamente cultivos como papa, zanahoria, cebolla y fresa en una extensión de 39.83 ha para 42 unidades de manejo.

Dichos cultivos al encontrarse en estas beneficiosas condiciones de suelo hacen que expresen al máximo su potencial en el uso adecuado agua, y en materia de riego es un área que tiene gran oportunidad de mejora para la gestión de los productores. Esta necesidad evidenciada es la que permite poder crear e implementar una herramienta de gestión que les ayude en la gestión del recurso para que sus cultivos expresen los mejores rendimientos, tal como se menciona en el APÉNDICE 1.

La finalidad del proyecto consistió en dar continuidad a la etapa 1 del proyecto: “PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y SISTEMAS DE RIEGO DE LOS PRODUCTORES DE LA ZONA NORTE DE CARTAGO-ESTUDIOS BÁSICOS”, el cual fue desarrollado en II semestre de 2021 generando gran cantidad de información espacial tanto de tipos de suelos de cada una de las parcelas como de distribución hidráulica de la red de conducción de la SUA, lo cual va a permitió la integración de técnicas de agricultura de precisión generar un modelo de gestión del recurso hídrico y su aplicación en riego.

Esto permitió la generación de diseños de campo específicos en riego localizado, permitiendo primero parametrizar el consumo de agua tanto para cada unidad de producción, así como dar las bases para un método de gestión según los umbrales de humedad.

Por otro lado, permite conocer el caudal total que demandaría la red en las condiciones de diseño propuestas.

8. Estrategia de abordaje

La estrategia de abordaje del proyecto se basó inicialmente en la integración de la información y entregables del proyecto: ” 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)”, para aprovechar la gran cantidad de datos generados y darle continuidad al flujo de trabajo en materia de caracterización de la unidades productivas y de diseño de riego. En segunda etapa se realizó el levantamiento y colecta de la información adicional requerida para los diseños de riego. La estrategia por etapas se muestra en el flujograma de la Figura 2.

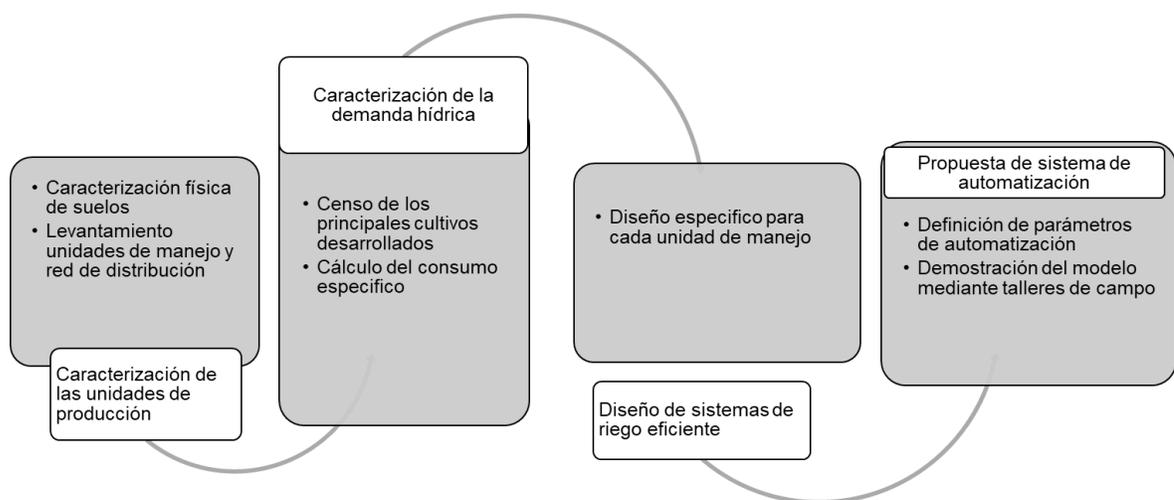


Figura 2: Flujograma de abordaje del proyecto

Metodológicamente las etapas se trabajaron de la siguiente manera:

1. Caracterización de las unidades de producción:

En este componente se integró los datos espaciales de cada una de las unidades de manejo según el cultivo, tipo de suelo del lugar. Adicionalmente se hizo la implementación tecnológica a través de sistemas GNSS para la obtención del relieve mediante mediciones con receptores GPS RTK.

2. Caracterización de la demanda hídrica:

Como ya se cuenta con la información de física de suelos y de la distribución de la red que alimenta el caudal a la entrada de cada una de las unidades de las parcelas; adicional se realizó un censo a cada uno de los productores con el fin de conocer los cultivos que desarrollan y con esto poder conocer el consumo de agua en cada en las unidades de producción.

3. Diseño de sistemas de riego eficiente:

Toda la información que se menciona en los puntos anteriores se logró gestionar en un sistema de información geográfica que sirvió de base para poder tener insumos base de diseño eficiente.

La propuesta de diseño se basó en riego localizado por goteo, el cual fue generado para cada parcela y para su construcción se utilizó una herramienta de diseño asistida, lo cual permitió generar diferentes escenarios y seleccionar el que mejor se basara en las características de abasto de la red y relieve para que pueda cumplir con el suministro de agua según el requerimiento del cultivo en cada unidad de producción.

4. Propuesta sistema de automatización:

La propuesta del sistema de automatización baso en el control del consumo de agua que debe de aplicarse en el suelo. Dicho parámetro se obtuvo del diseño específico de riego cada parcela, el cual es el que se propone como sistema de control a través de sensores de humedad.

El detalle de los métodos y materiales utilizados se detalla en el APÉNDICE 2.

9. Análisis de resultados

9.1 Resultados obtenidos

1. Caracterización de las unidades de producción:

La caracterización de las unidades de producción mostro que en la zona se cuenta con suelos con alta capacidad de drenaje debido principalmente a que predominan texturas del orden de Franco arcillo arenoso a Franco arenoso, además de que la medición del relieve arrojo pendientes que oscilan desde el 10 hasta el 50% inclusive, lo cual predetermina estas zonas a que se recomiendo el uso de riego localizado, ya que el tipo de suelo como se mencionó genera alta permeabilidad, lo que reduce se traduce en una baja capacidad de retención de agua, además lo pronunciado de la topografía manifiesta que son zonas sumamente propensas a la erosión, lo cual

no genera condiciones para riegos superficiales ni por aspersión como se maneja tradicionalmente. El resultado se muestra en el APÉNDICE 3.

2. Caracterización de la demanda hídrica:

Para la caracterización de la demanda hídrica se realizó una consulta detallada a cada uno de los productores sobre cuáles son los cultivos principales en sus parcelas, encontrándose que los principales cultivos desarrollados son cebolla, papa y zanahoria.

El cálculo del consumo de agua se basó en las características ambientales de la zona y las condiciones suelo-cultivo. El resultado se muestra en el APÉNDICE 4.

3. Diseño de sistemas de riego eficiente:

Al tratarse de una propuesta de riego localizado, se determina que el área efectiva de riego puede reducirse en un 20%, lo cual se traduce en un ahorro del volumen total de riego por aplicar. Además de que la frecuencia de riego propuesta es de 2 días, lo cual da una oportunidad a la red de poder abastecerla con un caudal máximo de 9,92 l/s en demanda máxima a un ritmo de riego de 0,64 ha/h bajo tiempos de riego de 1 h.

El detalle de diseño para cada parcela se muestra en extenso en los mapas de diseño hidráulicos mostrados 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 6.

10. Logro del propósito y los componentes

Propósito:			
Componentes	Indicador	% de logro	Comentarios
Caracterización de las unidades de producción	38 mapas	100	
Caracterización de la demanda hídrica	Base de datos y plantilla de cálculo.	100	
Diseño de sistemas de riego eficiente	38 mapas de diseño hidráulico de riego localizado.	100	
Propuesta sistema de automatización	Asistencia a reuniones o atención en el campo	100	
Taller gestión del agua	Diagrama de interpretación de los valores de humedad.	100	La asistencia debe mejorar en los talleres, por lo que se debe de comprometer más a los beneficiarios.

11. Integración de la academia:

Asistencias Estudiantiles

Nombre del estudiante	Carrera	Actividades realizadas
John Barboza Sanchez	Ing. Agrícola	Levantamiento de información de campo con equipos especializados, además de la generación del sistema de información geográfica del proyecto.
Ericka Picado Mora	Ing. Agrícola	Levantamiento de información de campo con equipos especializados, además de la generación del sistema de información geográfica del proyecto.
Esteban Rodriguez Leandro	Ing. Agrícola	Levantamiento de información de campo con equipos especializados, además del diseño con software específico de riego.

Trabajos de Grado y Postgrado

Nombre de obra	Tipo de obra (TFG, prácticas de especialidad, Tesis)	Autores	Enlace al documento
No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Cursos

Curso	Carrera /Programa externo	Objetivo del curso	Actividades realizadas (giras académicas, proyectos de cursos, actividades de clase)	Evidencias (enlace al documento)
Taller Gestión del Agua	Curso-Taller con fondos de la Ley del Cemento- Programa de Regionalización	Analizar las variables de suelo que influyen en la agricultura de precisión para productores hortícolas	Curso teórico modalidad taller con productores de la Sociedad de Usuarios de Agua (SUA) del proyecto Sanatorio Durán, Cartago.	Ver APENDICE 7

12. Cumplimiento del plan de difusión

El plan de difusión se llevó a cabo mediante el taller mencionado en el punto anterior, en el cual fue impartido por los extensionistas Kerin Romero Calvo y Milton Solórzano Quintana, contando con la participación de 4 productores y de un representante de la Corporación Hortícola Nacional en la sesión de cierre.

13. Ejecución Presupuestaria:

Partida específica	Monto solicitado CRC	Monto ejecutado CRC	Porcentaje ejecución	Justificación
Servicios de ingeniería y arquitectura	792,500.00	791,661.00	99.89%	
Viáticos dentro del país	33,500.00	18,500.00	55.22%	
Combustibles y lubricantes	100,000.00	0.00	0.00%	Debido al desfase en la apertura del presupuesto del proyecto, no se pudieron realizar todas las pruebas de suelo que se tenían

				estimadas, por lo que no se pudo aprovechar este recurso.
Alimentos y bebidas	32,709.00	32,708.41	100.00%	
Materiales y productos eléctricos - telefónicos y de cómputo	29,314.00	29,313.72	100.00%	
Repuestos y accesorios	21,227.00	20,500.00	96.58%	
Otros útiles - materiales y suministros diversos	47,250.00	47,250.00	100.00%	
Servicios Internos Unidad de Transportes	260,000.00	221,260.00	85.10%	No se realizaron todas las giras programadas debido al desfase en la apertura del presupuesto del proyecto
Servicios Internos Unidad Publicaciones	151,000.00	141,414.00	93.65%	
Becas estudiante asistente especial	532,500.00	532,500.00	100.00%	

14. 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, 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 y tercero la apertura de los presupuestos operativos.

15. Observaciones generales 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.

16. Agradecimientos

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, la Dirección de Regionalización y a la Escuela de Ingeniería Agrícola del TEC por el apoyo con los recursos necesarios, así como a la SUA Sanatorio por la disposición y apertura al trabajo.

17. 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)

18. Apéndices

APENDICE 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 (Aquenio), 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 6 presenta los mejores precios para fruta fresca. Si se siembra durante a 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. Pertenece 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 obtenido 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 (Ferreya 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.

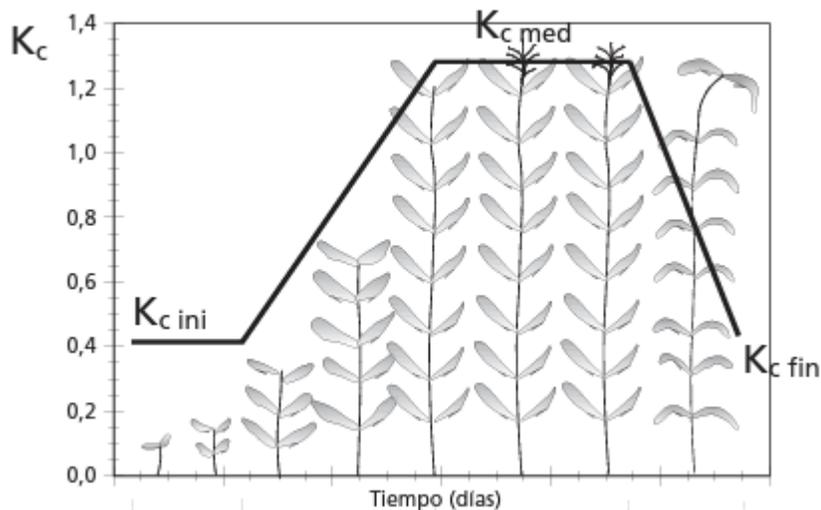


Figura 3. Curva Generalizada del Coeficiente del Cultivo

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.

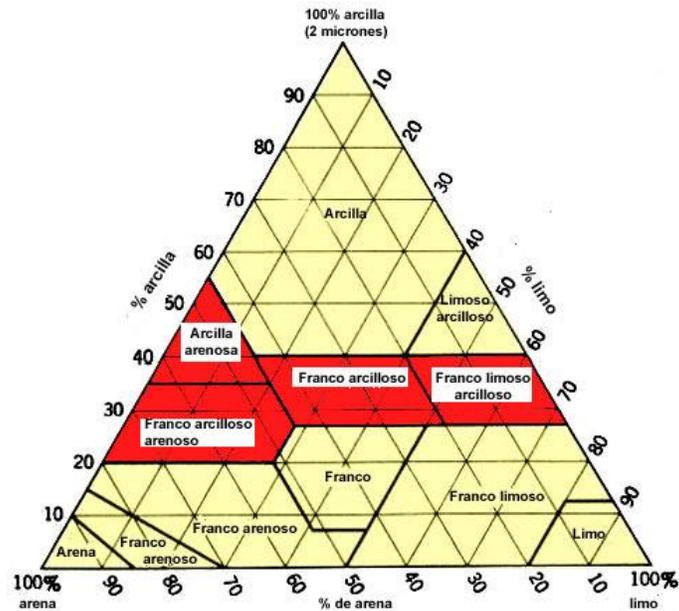


Figura 4. Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo según el tamaño de las partículas, de acuerdo con el USDA
 Fuente: FAO, 2017(<https://n9.cl/5zp80>)

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 marchites 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, Martín & 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 (Ferrecchio, 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 un 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 cementos, 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.](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#:~:text=La%20textura%20del%20suelo%20puede,una%20elevada%20proporci%C3%B3n%20de%20arena.)

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.
- García, 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 amarilidáceas 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://drcomag.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).)

APENDICE 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 se 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 ortomosaicos que fueron generados en la primera etapa de este proyecto se colocaron sobre estas 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 práctico 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.

APENDICE 3. Caracterización de las unidades de producción

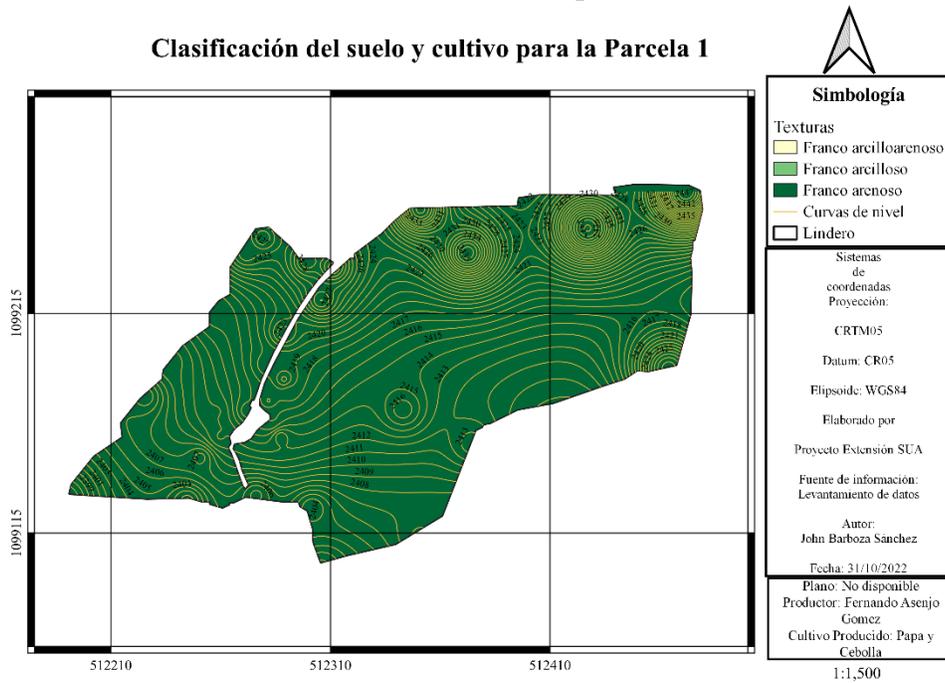


Figura 5. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 1. Fuente: Propia.

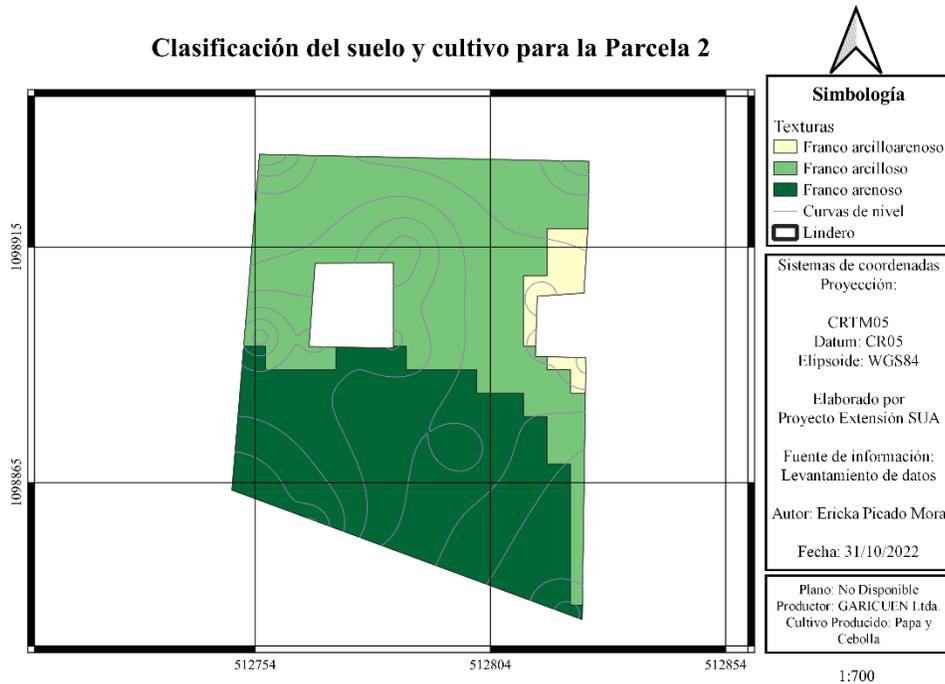


Figura 6. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 2. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivos para la Parcela 3

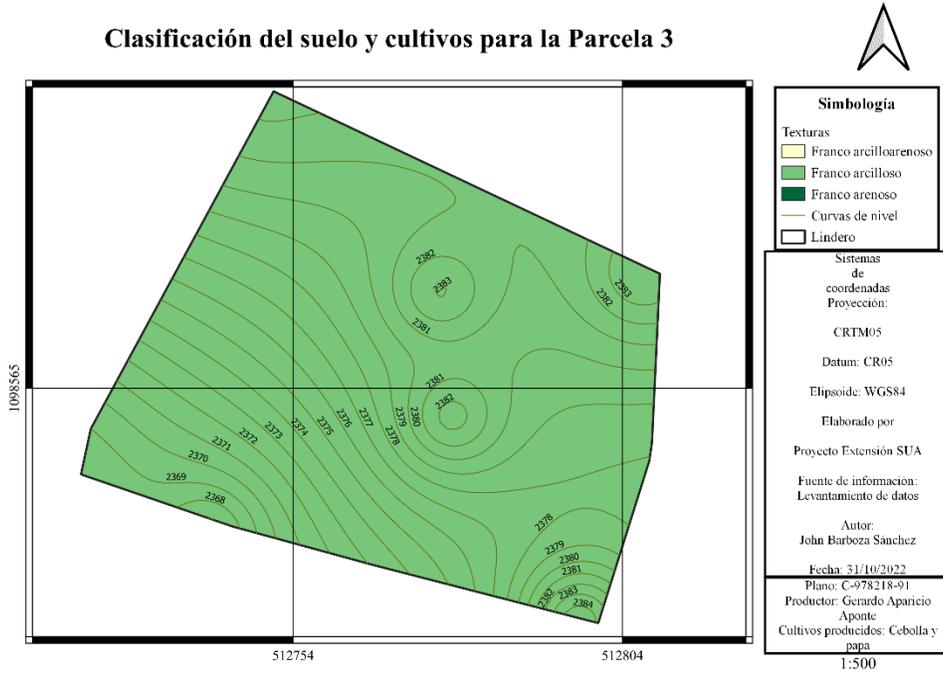


Figura 7. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 3. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivos para la Parcela 4

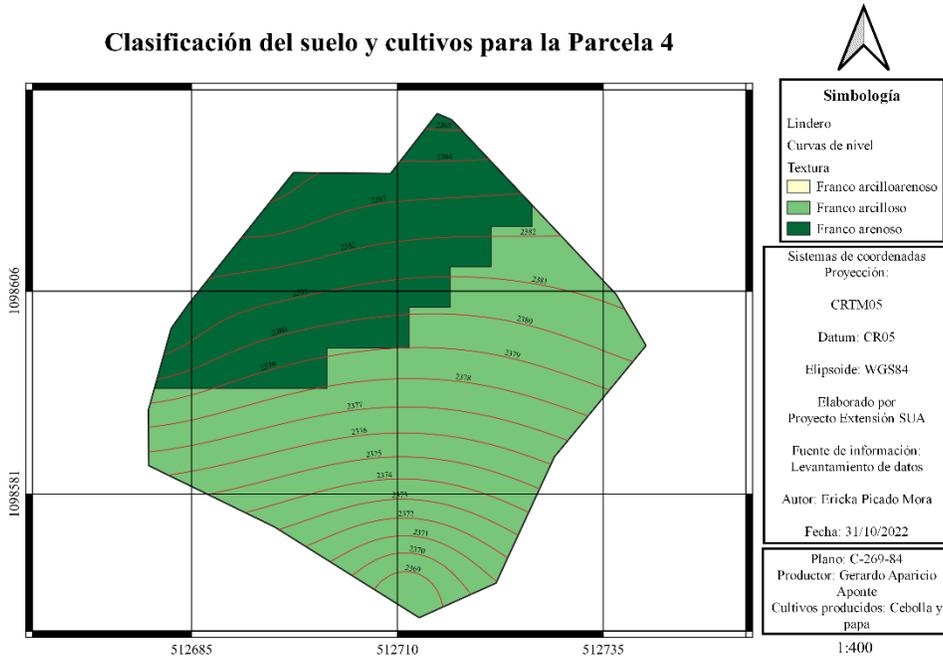


Figura 8. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 4. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 5

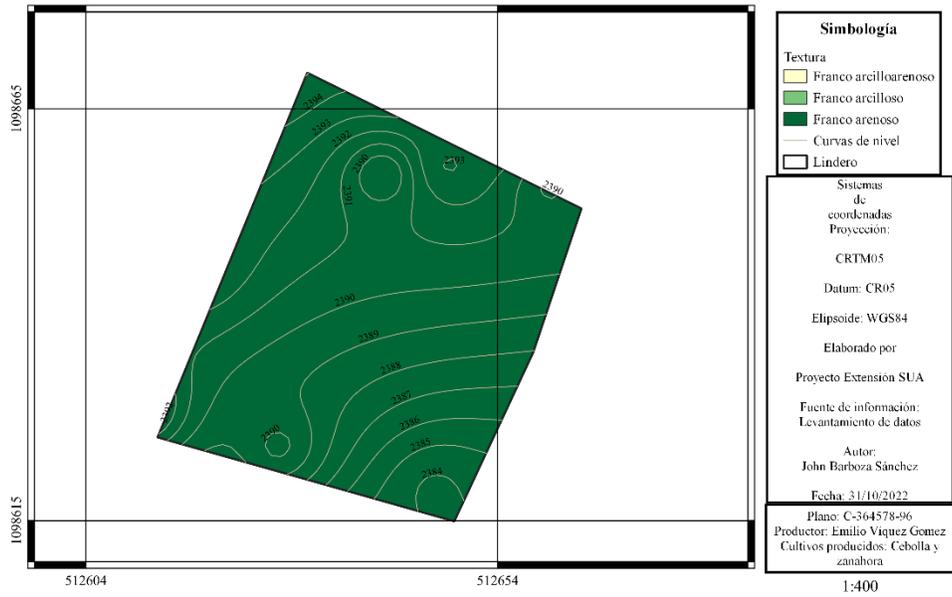


Figura 9. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 5. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 6

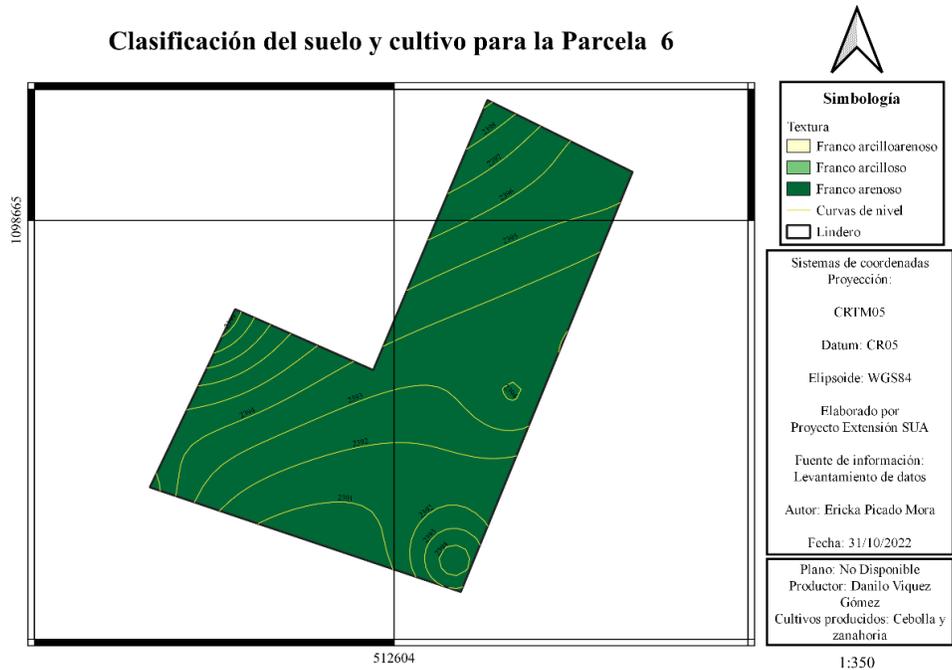


Figura 10. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 6. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 7



Figura 11. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 7. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 8

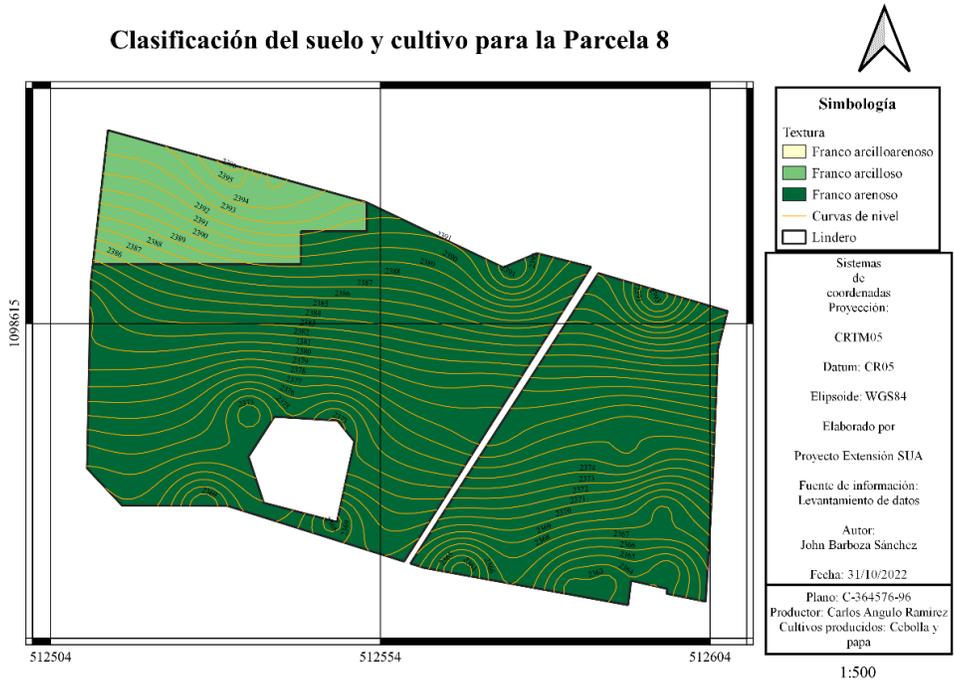


Figura 12. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 8. Fuente: Propia.



Figura 13. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 9. Fuente: Propia.

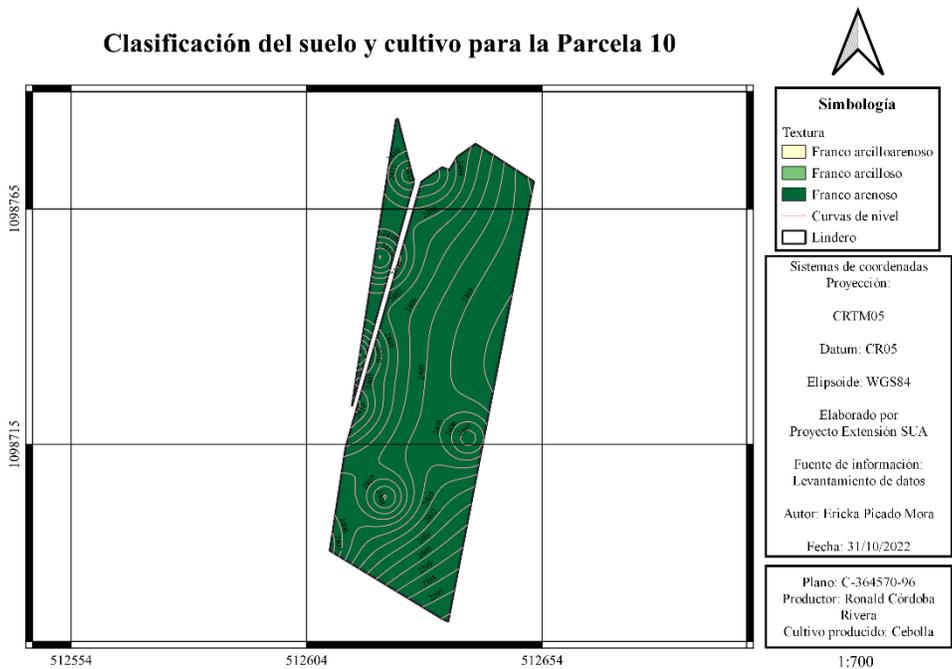


Figura 14. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 10. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 11

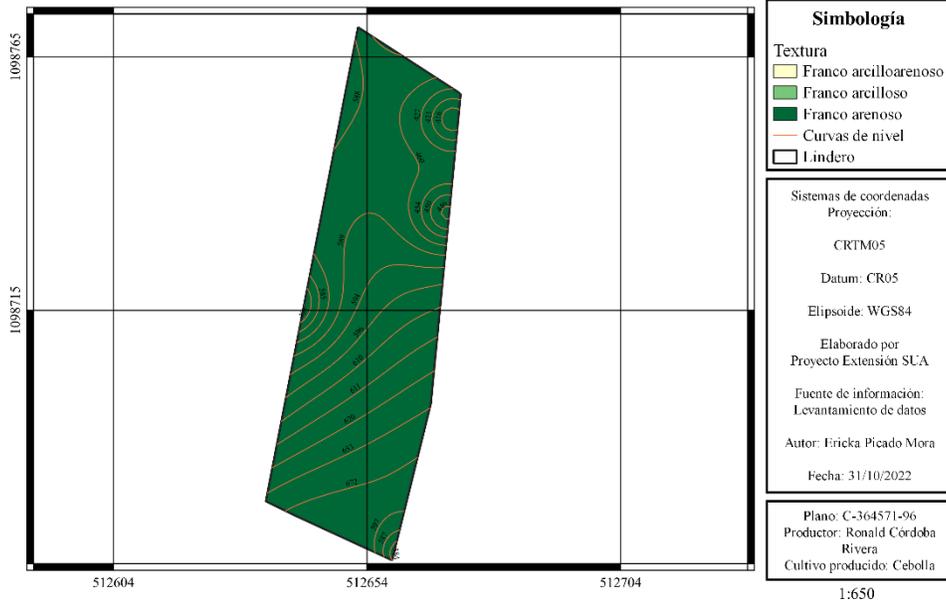


Figura 15. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 11. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 12

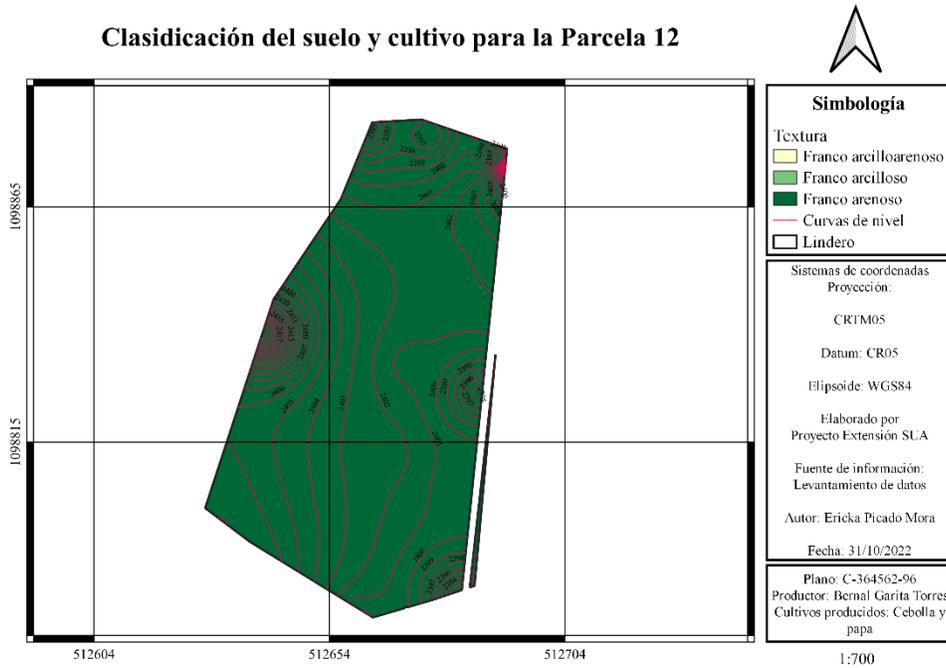


Figura 16. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 12. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 13

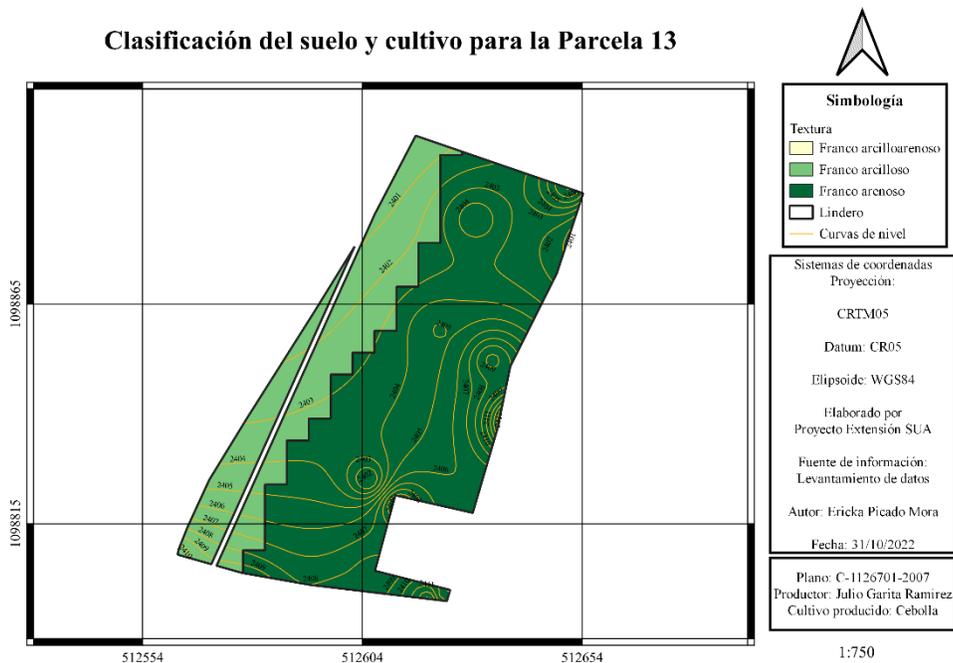


Figura 17. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 13. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 14

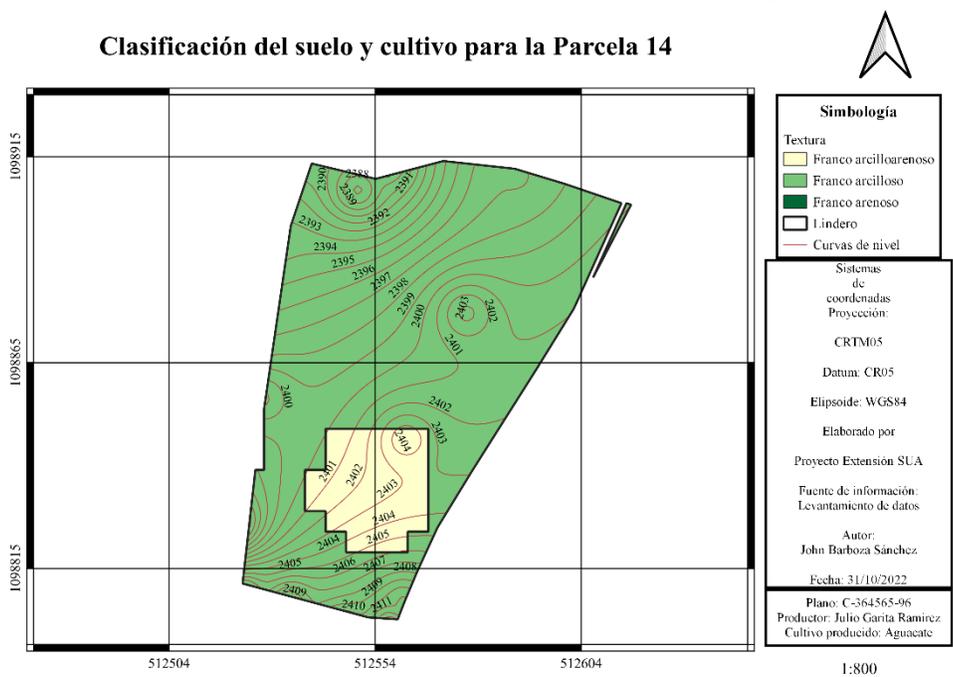


Figura 18. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 14. Fuente: Propia.

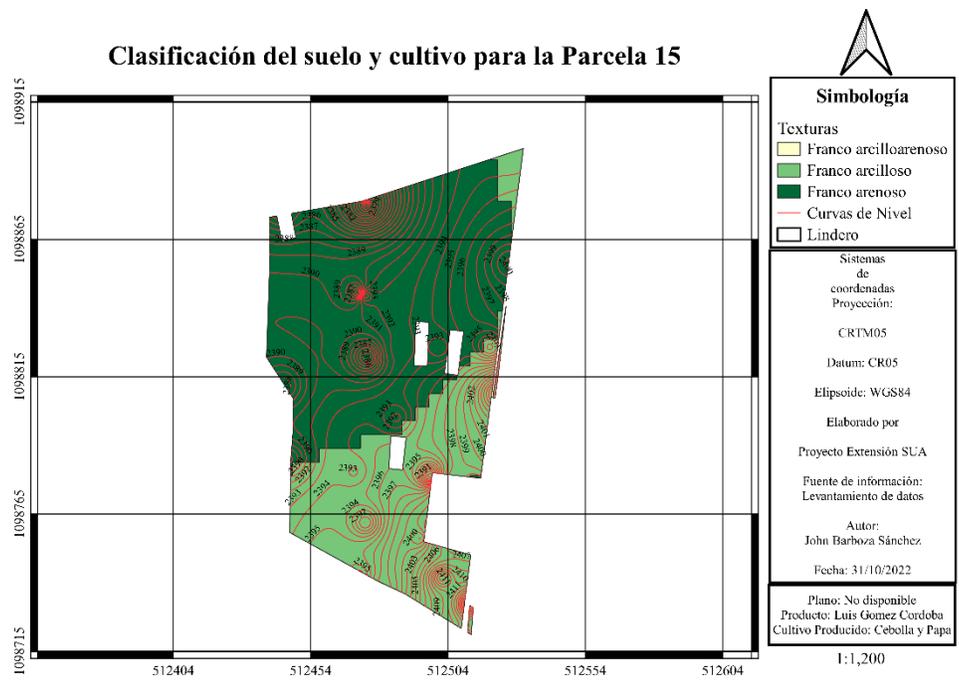


Figura 19. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 15. Fuente: Propia.

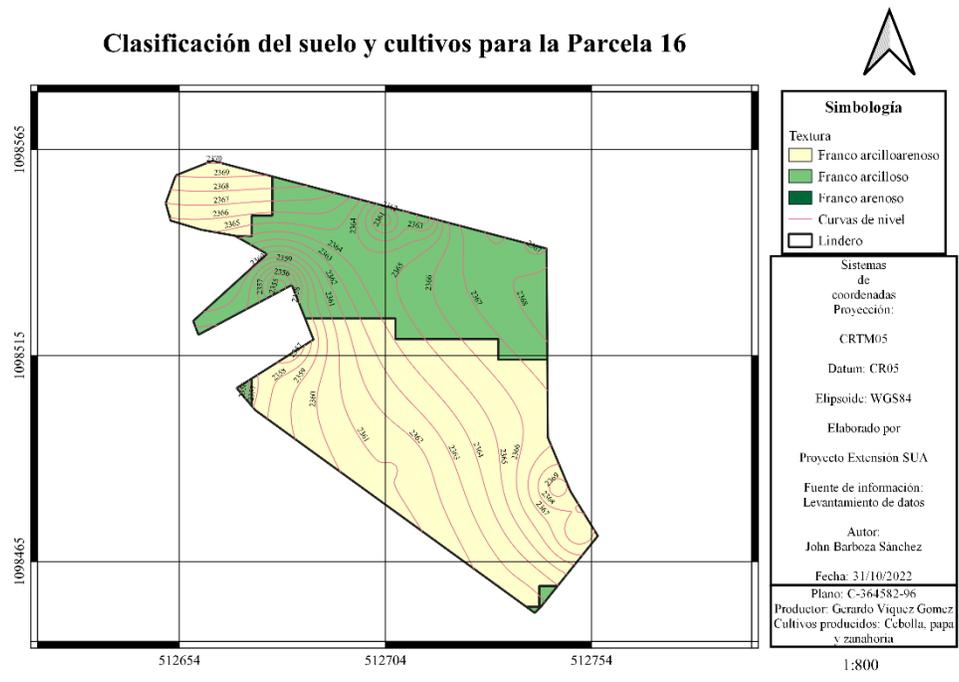


Figura 20 Clasificación del suelo y cultivo Parcela 16. Fuente: Propia.

Clasificación de suelo y cultivo para la Parcela 17

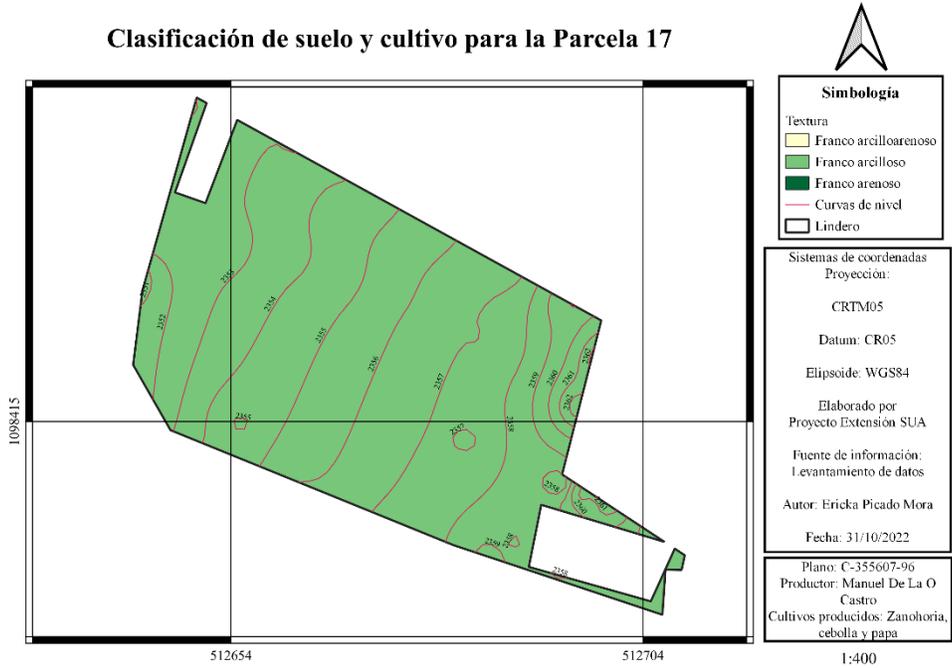


Figura 20. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 17. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 18

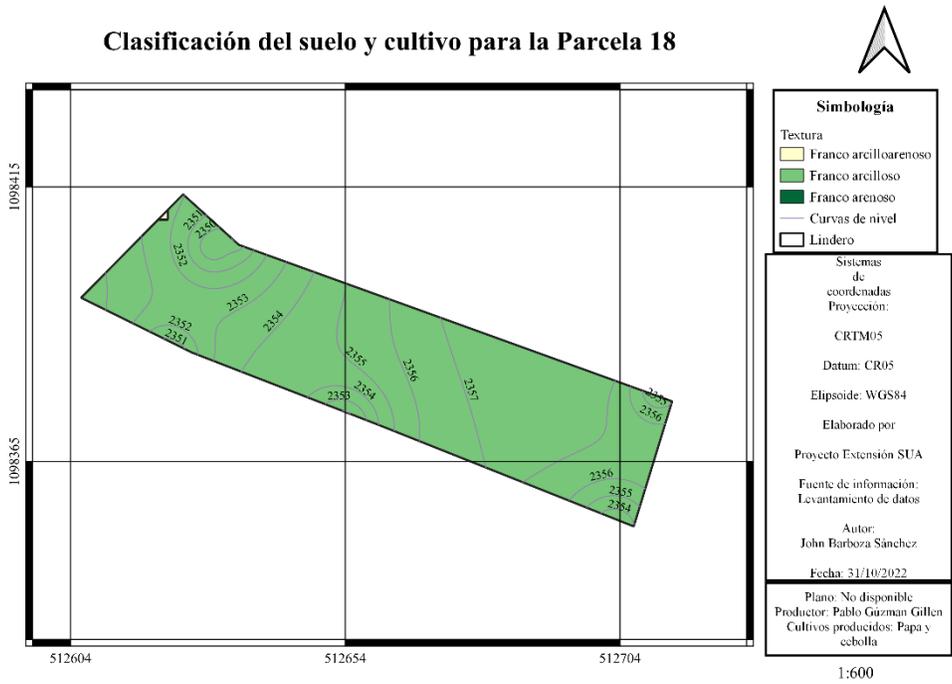


Figura 21. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 18. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 19

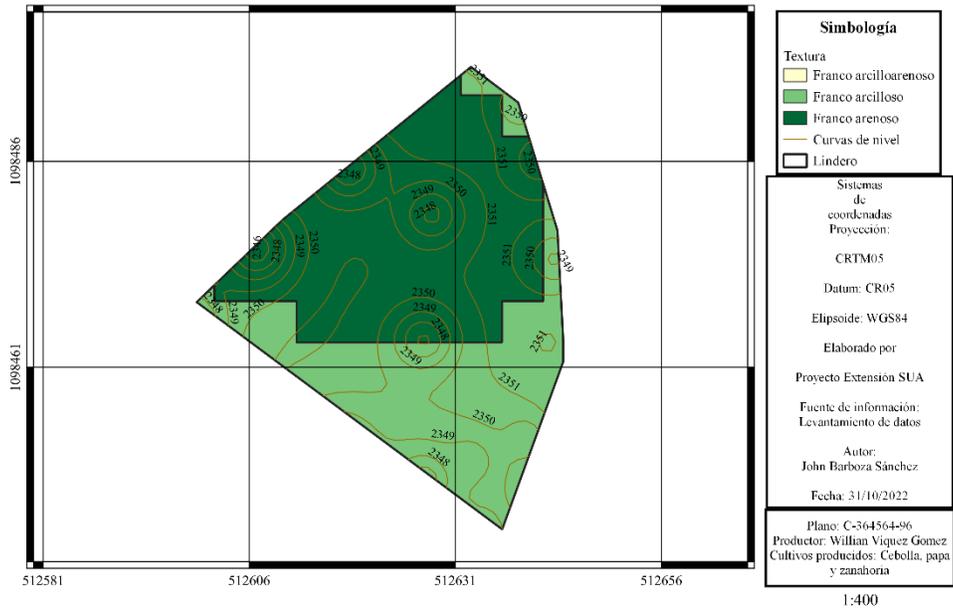


Figura 22. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 19. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 20

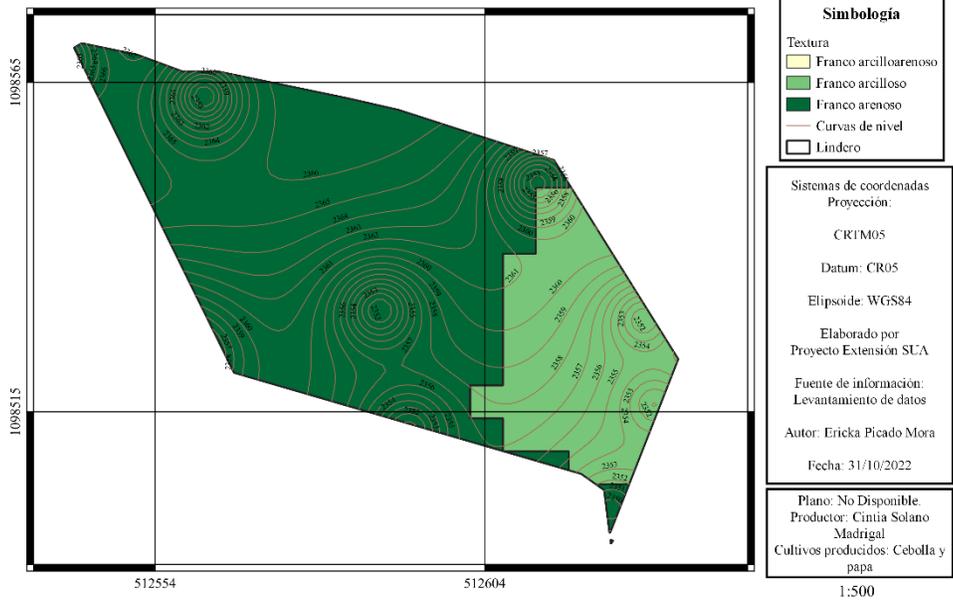


Figura 232. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 20. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la parcela 21

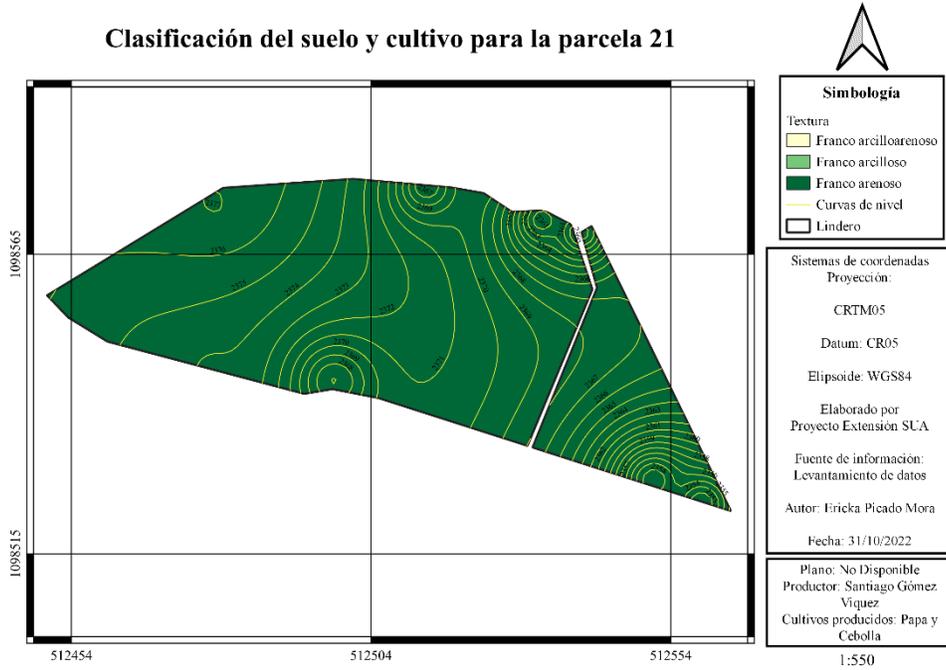


Figura 24. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 21. Fuente: Propia.

Clasificación de suelo y cultivo para las Parcelas 22 y 23

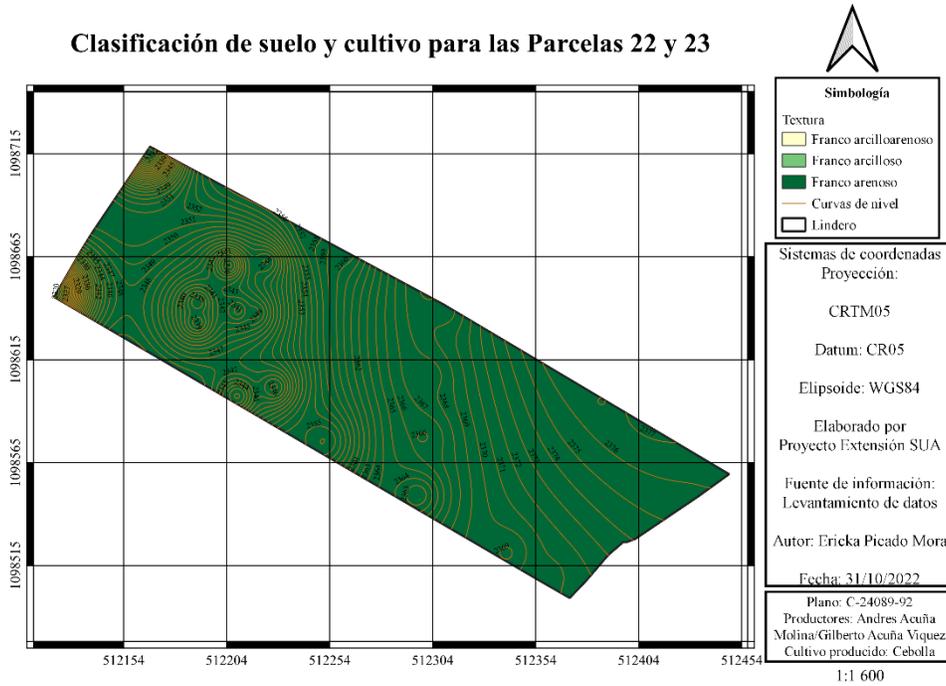


Figura 25. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 22 y 23. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivos para las Parcelas 24 y 25

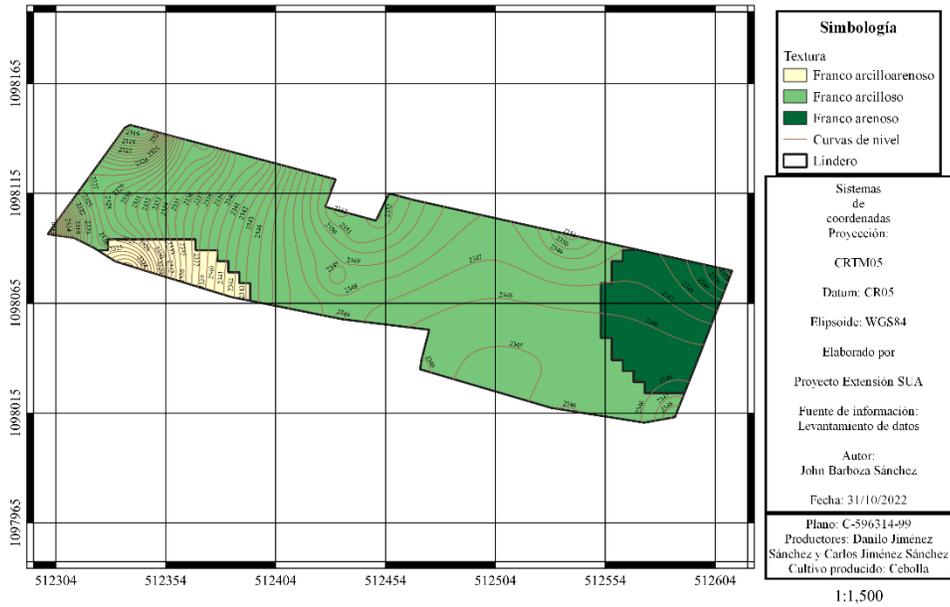


Figura 26. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 24 y 25. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 26

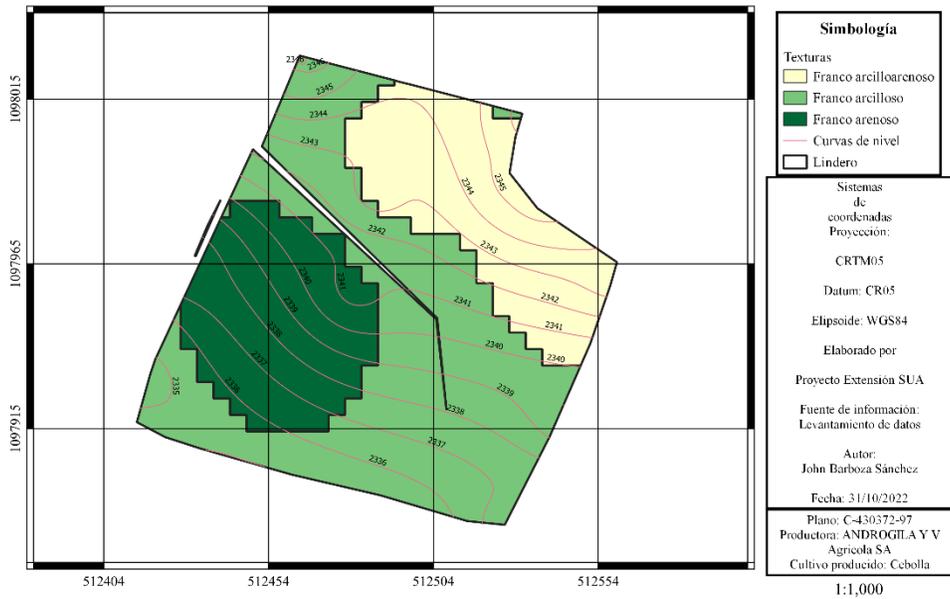


Figura 27 . Clasificación del suelo y cultivo Parcela 26. Fuente: Propia.

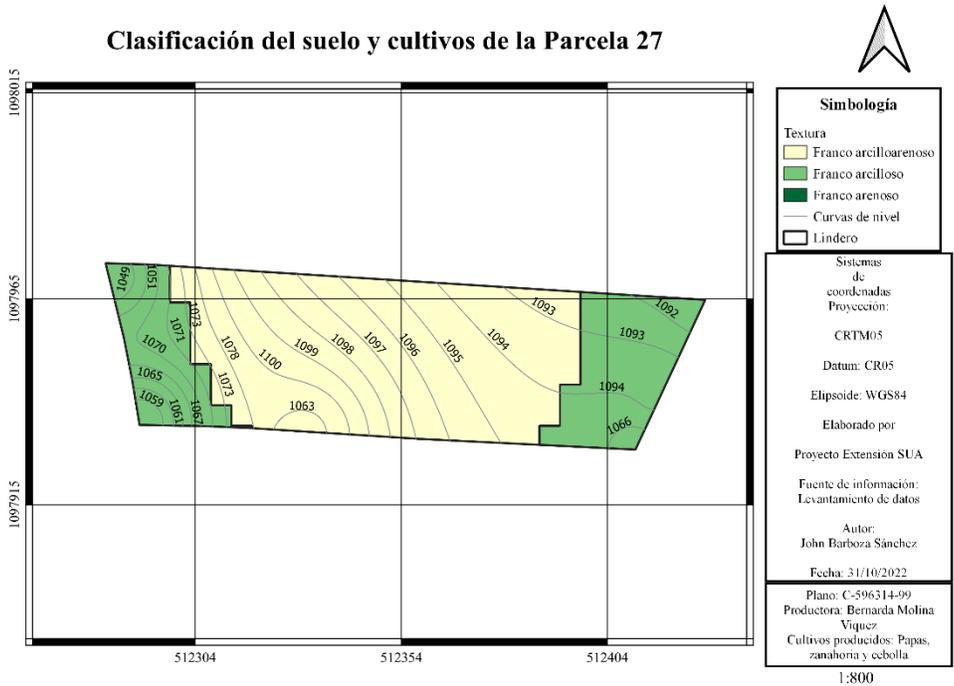


Figura 28. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 27. Fuente: Propia.

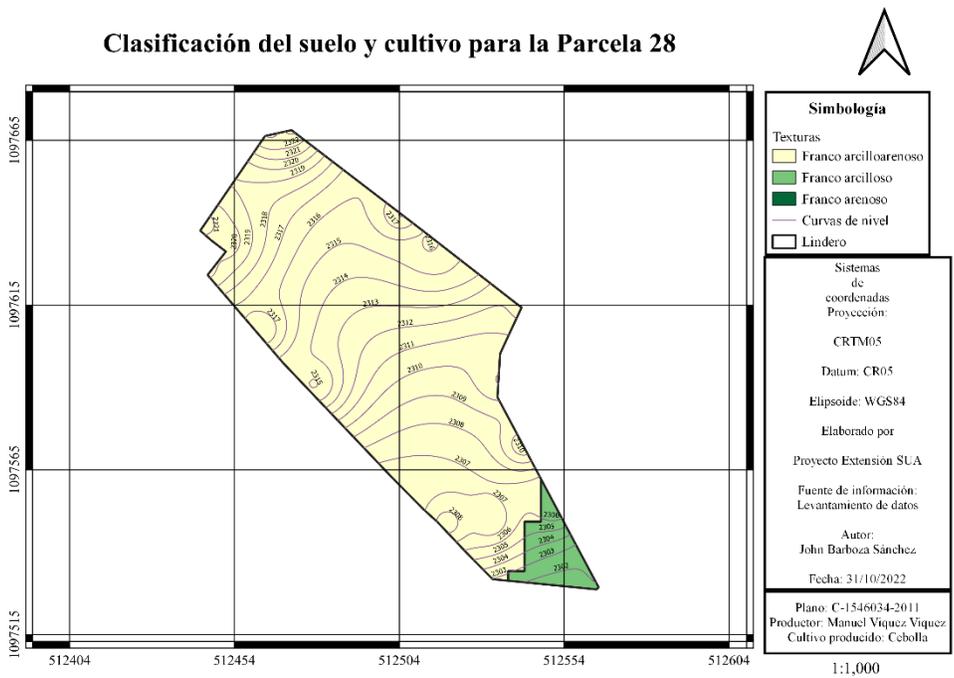


Figura 29. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 28. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 29

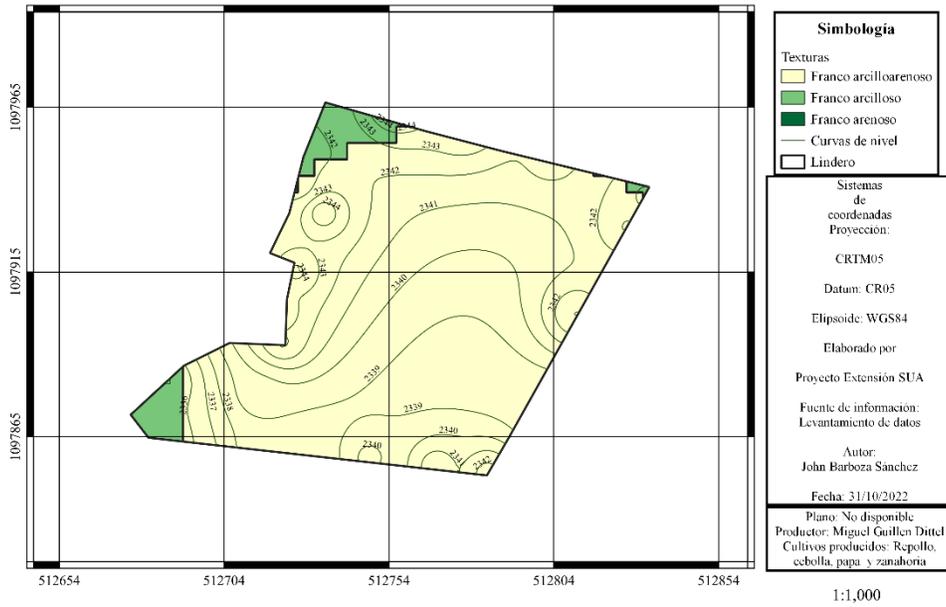


Figura 30. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 29. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 30

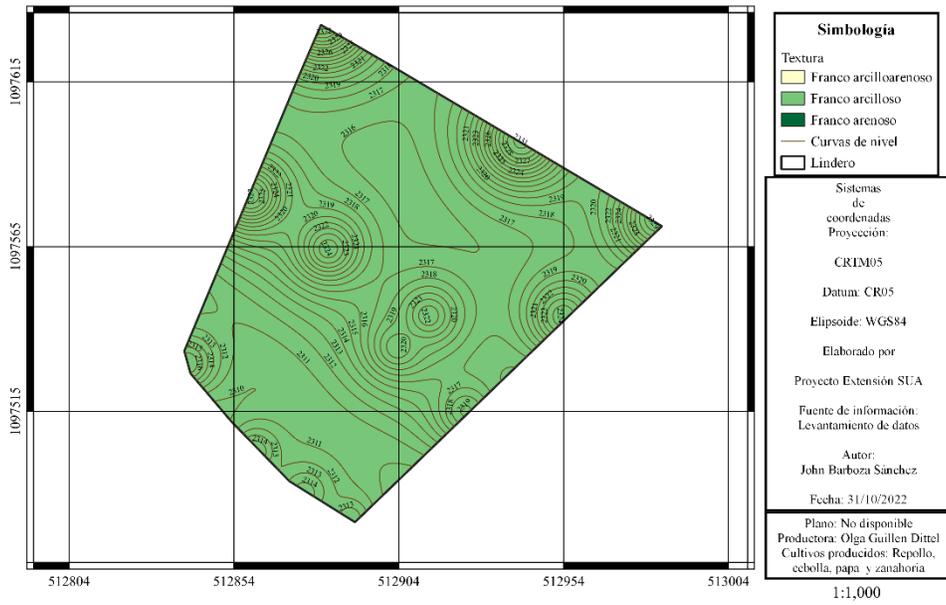


Figura 31. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 30. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo de la Parcela 31

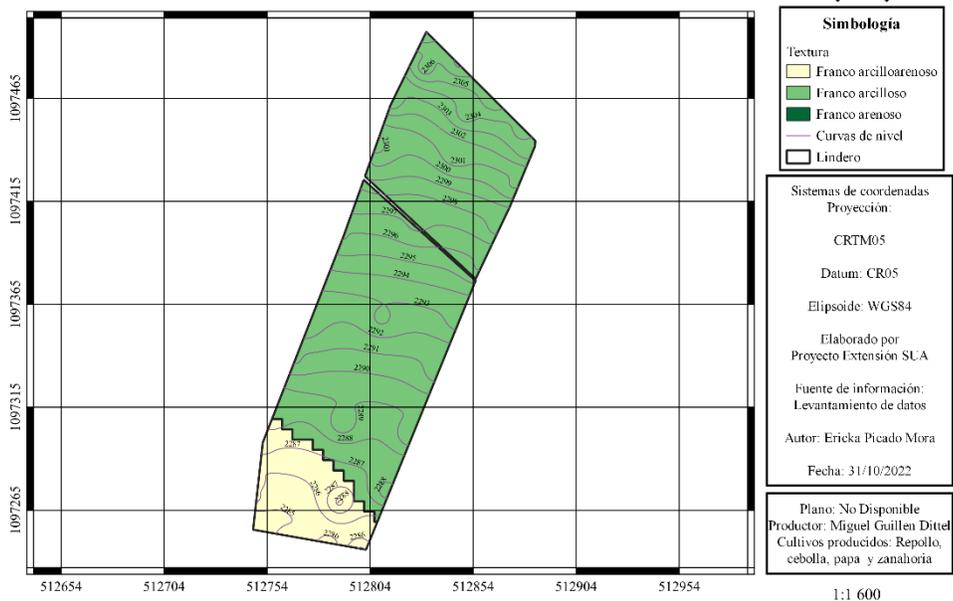


Figura 32. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 31. Fuente: Propia.

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. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 36

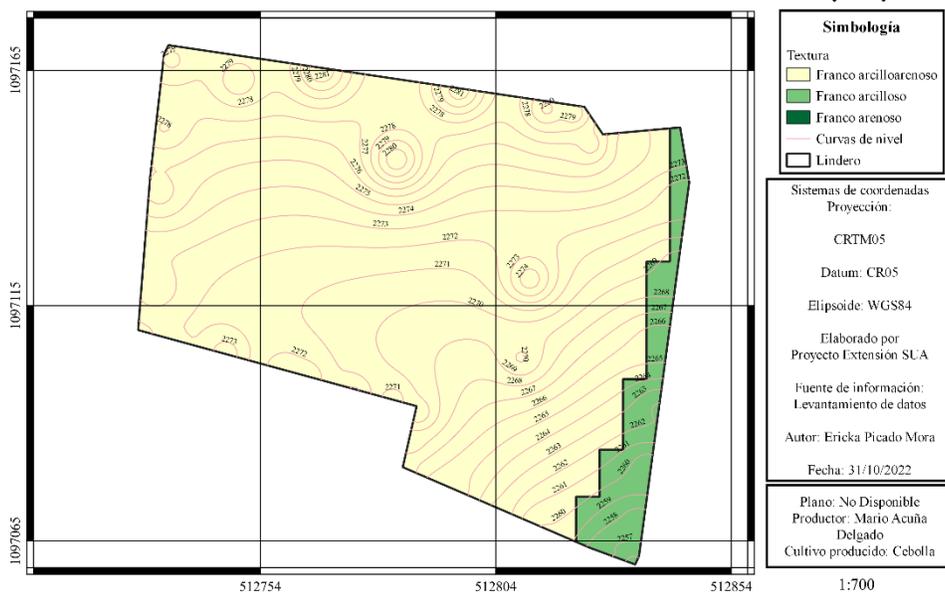


Figura 34. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 36. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivos para la Parcela 37

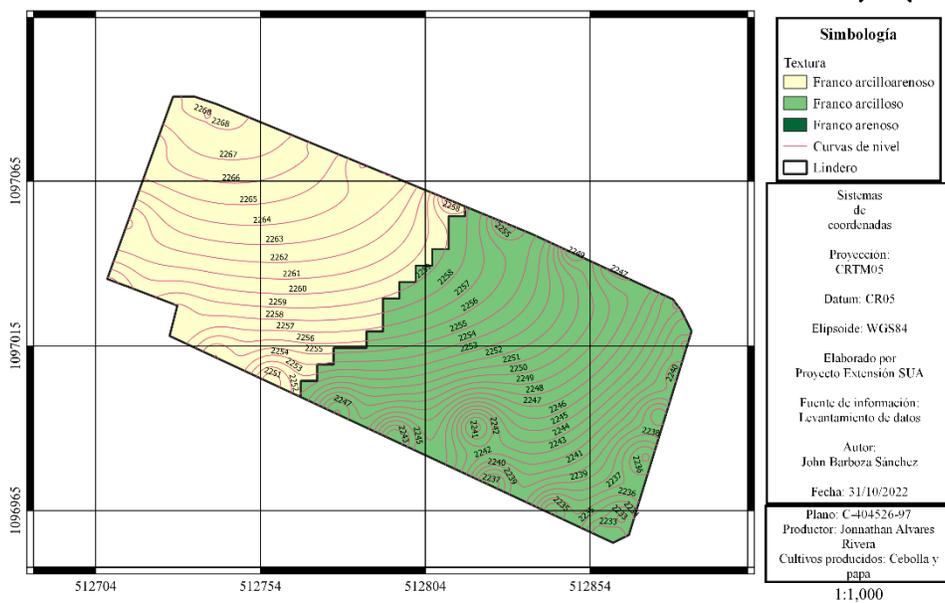


Figura 35. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 37. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para las Parcelas 38 y 39

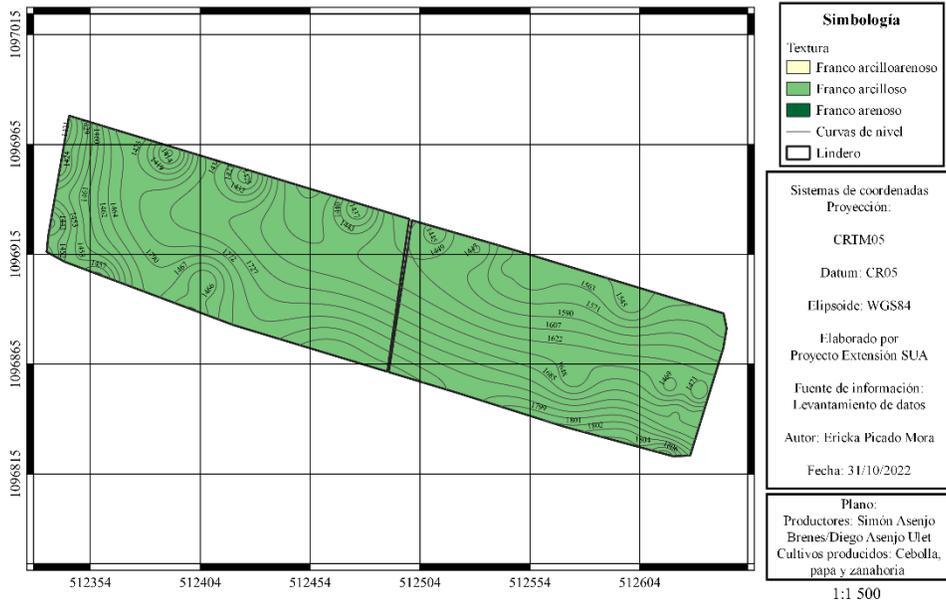


Figura 36. Clasificación del suelo y cultivo Parcelas 38 y 39. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 40

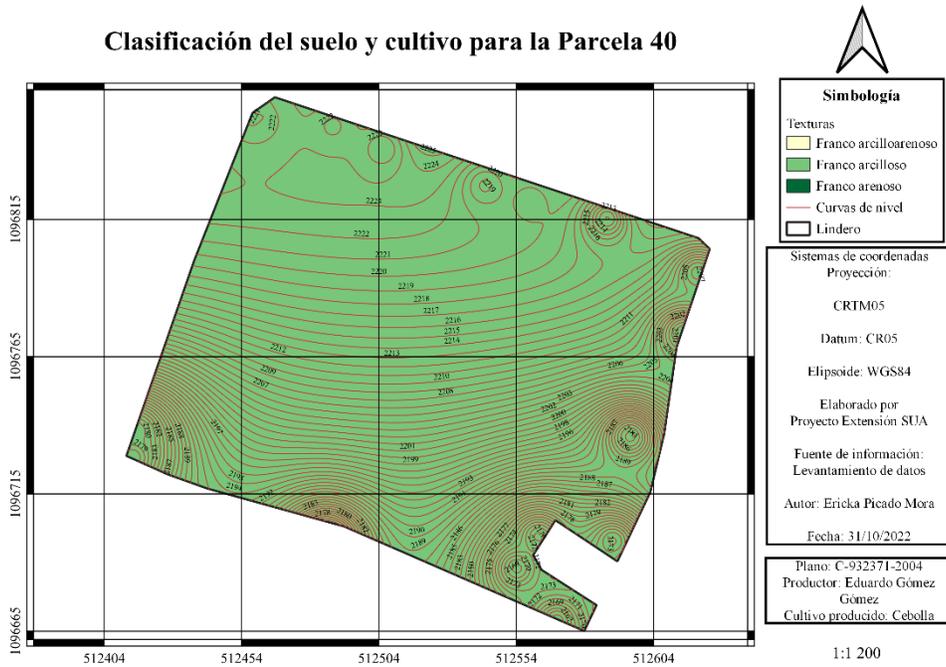


Figura 37. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 40. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 41

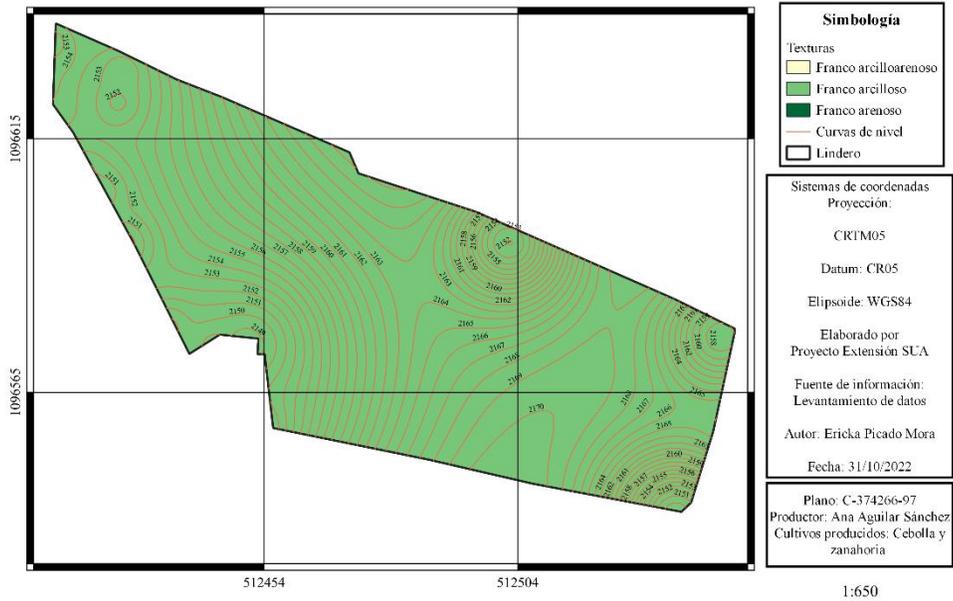


Figura 38. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 41. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 42

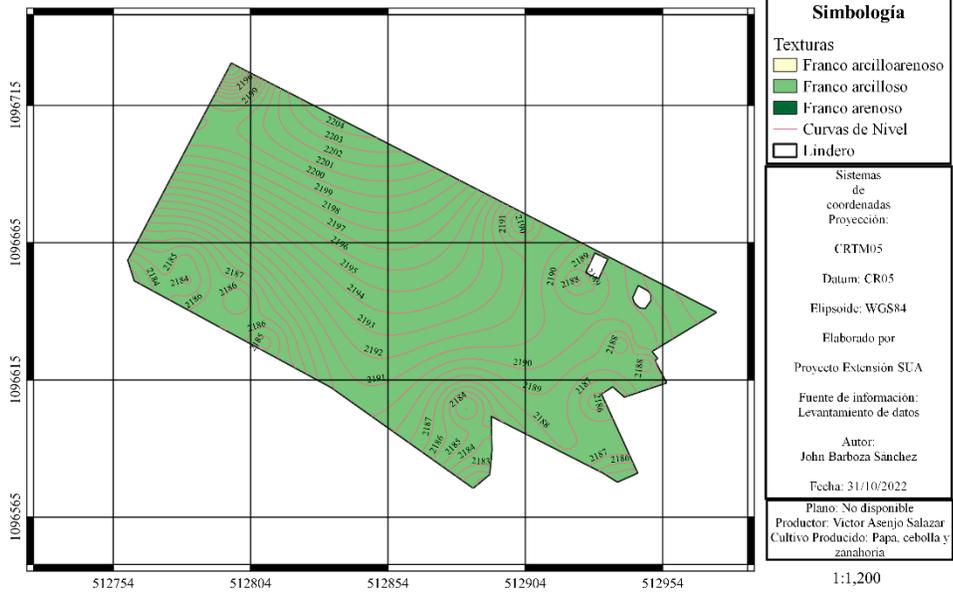


Figura 39. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 42. Fuente: Propia.

Clasificación de suelo y cultivo para la Parcela 43

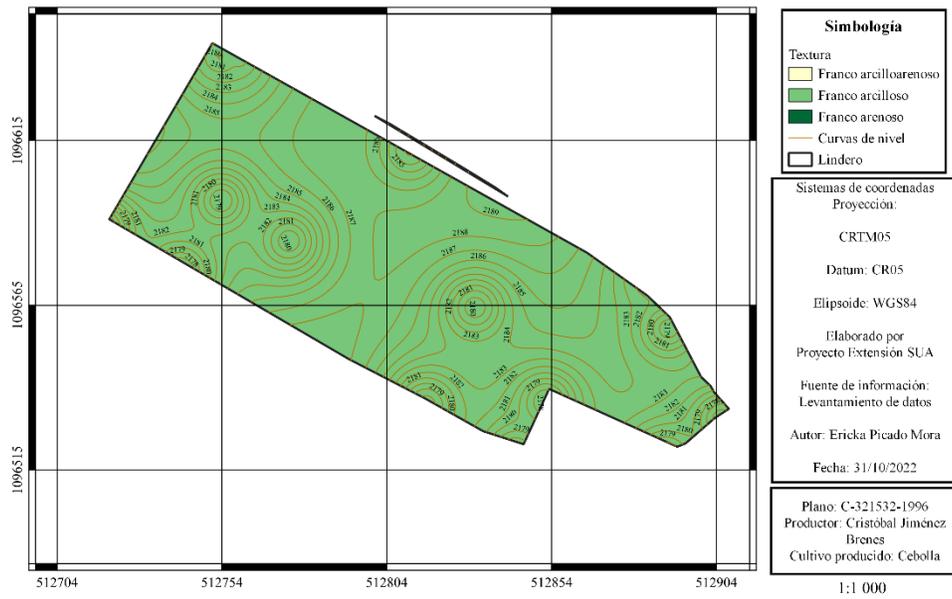


Figura 40. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 43. Fuente: Propia.

Clasificación del suelo y cultivo para la Parcela 44

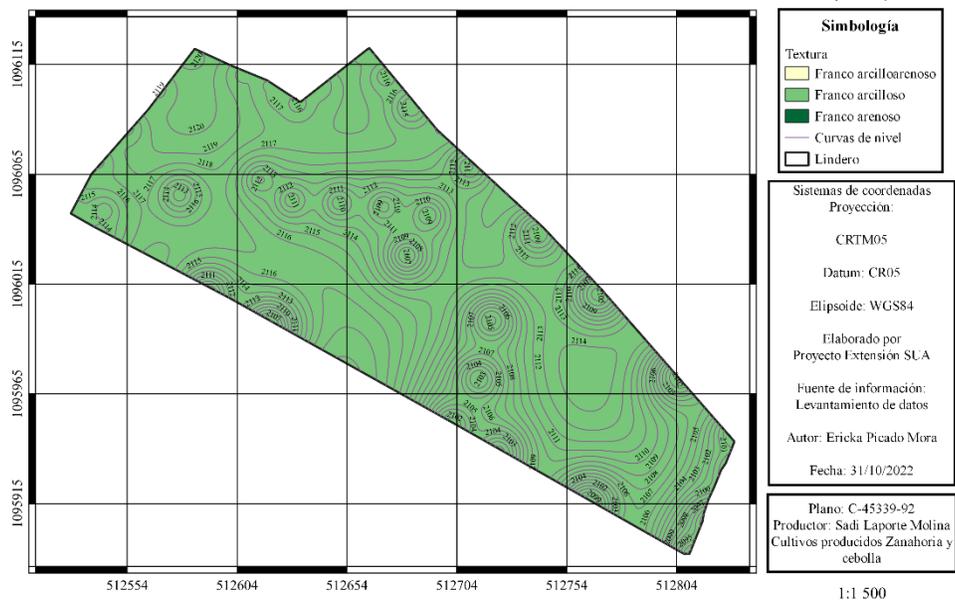


Figura 41. Clasificación del suelo y cultivo Parcela 44. Fuente: Propia.

APENDICE 4. Caracterización de la demanda hídrica

Cuadro AP4.1 Resultado del censo de los cultivos desarrollados

Parcela	Productor	Cultivos
1	ANA AGUILAR SANCHEZ	Cebolla y zanahoria
2	ANDERSON ARAYA LEITON	Cebolla y papa
3	ANDRES ACUÑA MOLINA	Cebolla
4	ANDROGILA Y V Agricola SA	Cebolla
5	ASDRUBAL RIVERA SANCHEZ	Cebolla
6	BERNAL GARITA TORRES	Cebolla y papa
7	BERNARDA MOLINA VIQUEZ	Cebolla, papa y zanahoria
8	CARLOS ANGULO RAMIREZ	Cebolla y papa
9	CARLOS JIMÉNEZ SANCHEZ	Cebolla
10	CARLOS SÁNCHEZ NUÑEZ	Cebolla y papa
11	CINTIA SOLANO MADRIGAL	Cebolla y papa
12	CRISTÓBAL JIMÉNEZ BRENES	Cebolla
13	DANILO JIMÉNEZ SANCHEZ	Cebolla
14	DANILO VIQUEZ GOMEZ	Zanahoria y cebolla
15	DIEGO ASENJO ULET	Cebolla

16	EDUARDO GÓMEZ GOMEZ	Cebolla
17	FERNANDO ASENJO GOMEZ	Cebolla y papa
18	FERNANDO RIVERA SANCHEZ	Cebolla, papa y zanahoria
19	GARICUEN Ltda.	Cebolla y papa
20	GERARDO APARICIO APONTE	Cebolla y papa
21	GERARDO APARICIO APONTE	Cebolla y papa
22	GERARDO VÍQUEZ GOMEZ	Cebolla, papa y zanahoria
23	GILBERTO ACUÑA VIQUEZ	Cebolla
24	J. EMILIO VÍQUEZ GOMEZ	Cebolla y zanahoria
25	JONNATHAN ALVARES RIVERA	Cebolla y papa
26	JOSÉ GÓMEZ VIQUEZ	Cebolla y papa
28	JULIO GARITA RAMIREZ	Cebolla
27	JULIO GARITA RAMIREZ	Cebolla
29	LUIS J. GÓMEZ CORDOBA	Cebolla y papa
30	LUIS RIVERA SANCHEZ	Cebolla y papa
31	MANUEL DE LA O CASTRO	Cebolla, papa y zanahoria
32	MANUEL VÍQUEZ VIQUEZ	Cebolla
33	MARIO ACUÑA DELGADO	Cebolla

34	MIGUEL GUILLEN DITTEL	Cebolla, papa y zanahoria
35	MIGUEL GUILLEN DITTEL	Cebolla, papa y zanahoria
36	OLGA GUILLEN DITTEL	Cebolla, papa y zanahoria
37	PABLO GUZMÁN GUILLEN	Cebolla y papa
38	RONALD ACUÑA VIQUEZ	Cebolla
39	RONALD CÓRDOBA RIVERA	Cebolla
40	RONALD CÓRDOBA RIVERA	Cebolla
41	SADI LAPORTE MOLINA	Zanahoria y cebolla
42	SANTIAGO GÓMEZ VIQUE	Cebolla y papa
43	SIMÓN ASENJO BRENES	Cebolla, papa y zanahoria
44	VICTOR ASENJO SALAZAR	Cebolla, papa y zanahoria
45	WILLIAN VIQUEZ GOMEZ	Cebolla, papa y zanahoria

Cuadro AP4.2 Diseño agronómico para cada unidad de producción

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

APENDICE 5. Diseño de sistemas de riego eficiente

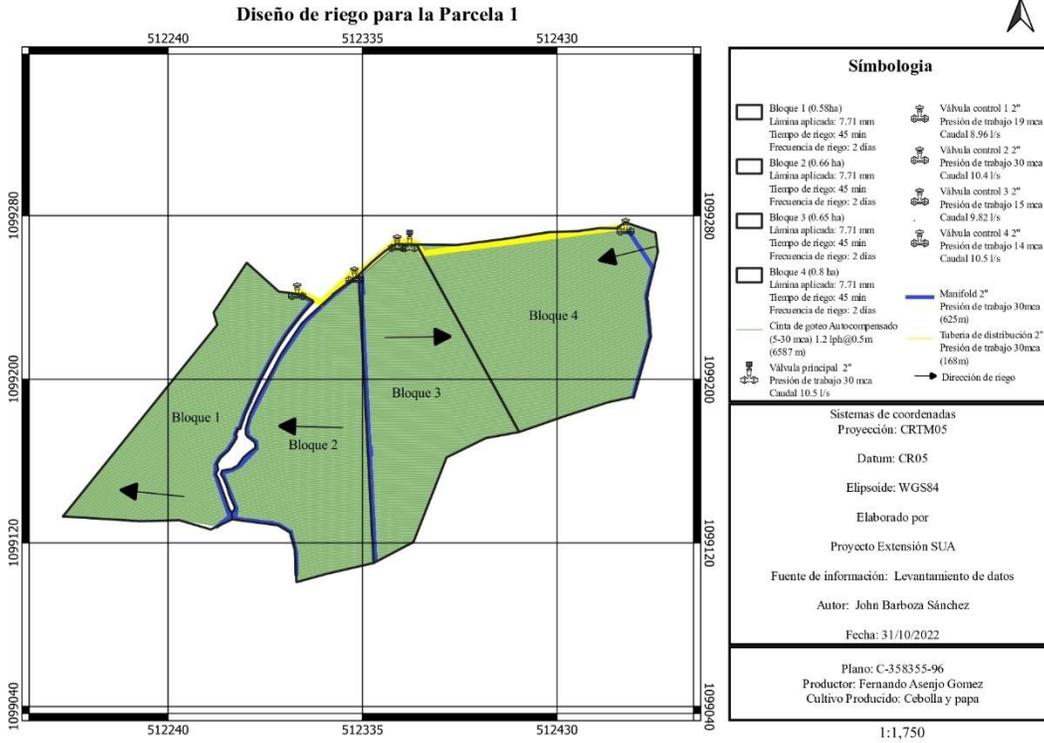


Figura 42. Diseño de riego por goteo Parcela 1. Fuente: Propia.

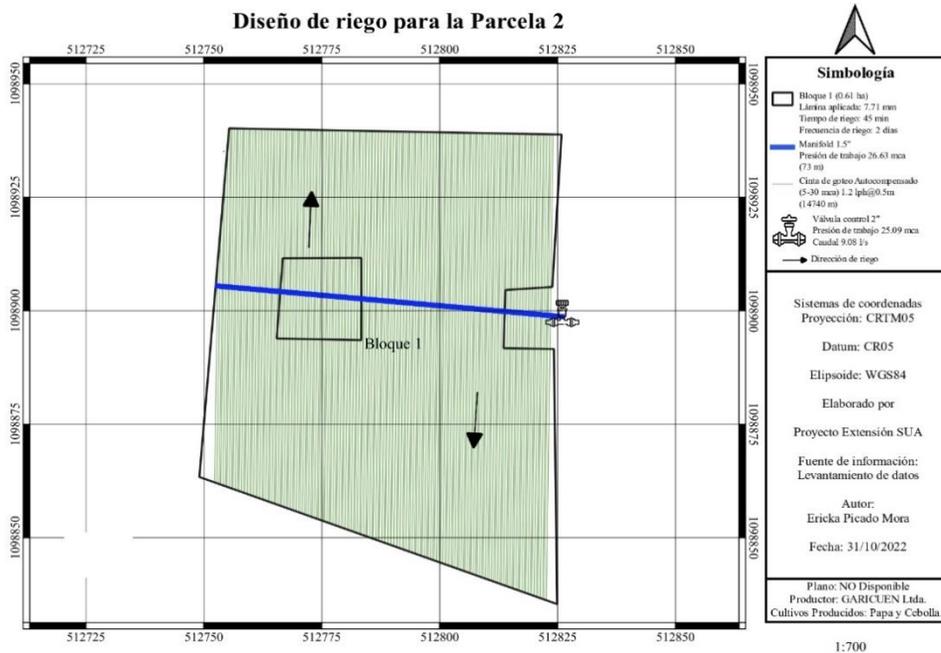


Figura 43. Diseño de riego por goteo Parcela 2. Fuente: Propia.

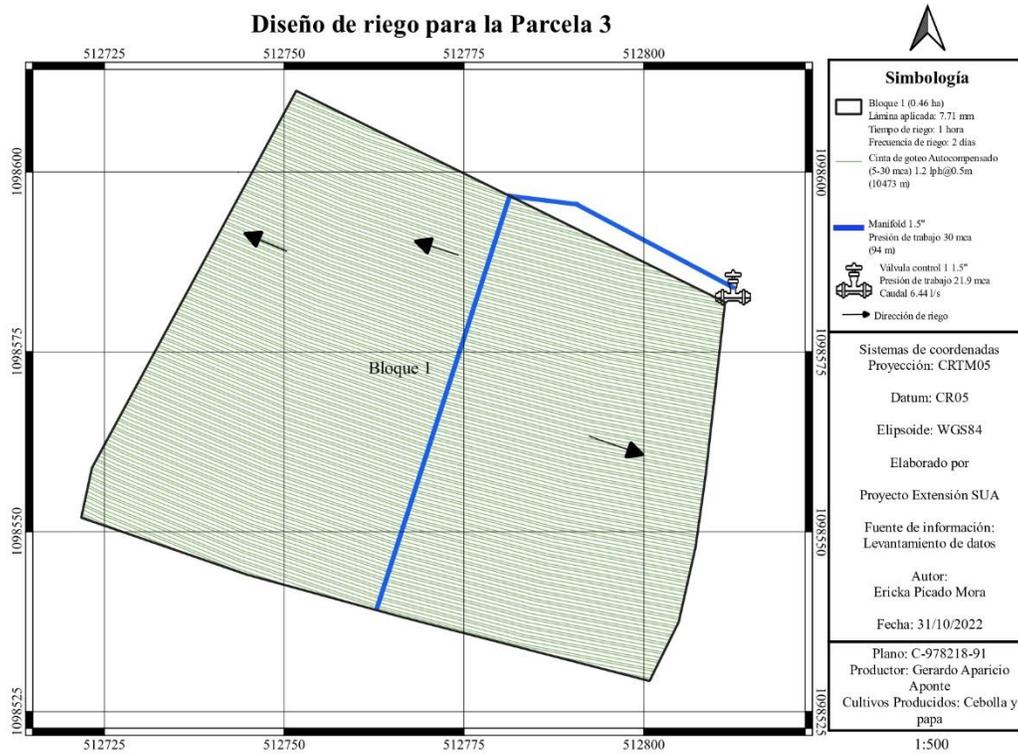


Figura 44. Diseño de riego por goteo Parcela 3. Fuente: Propia.

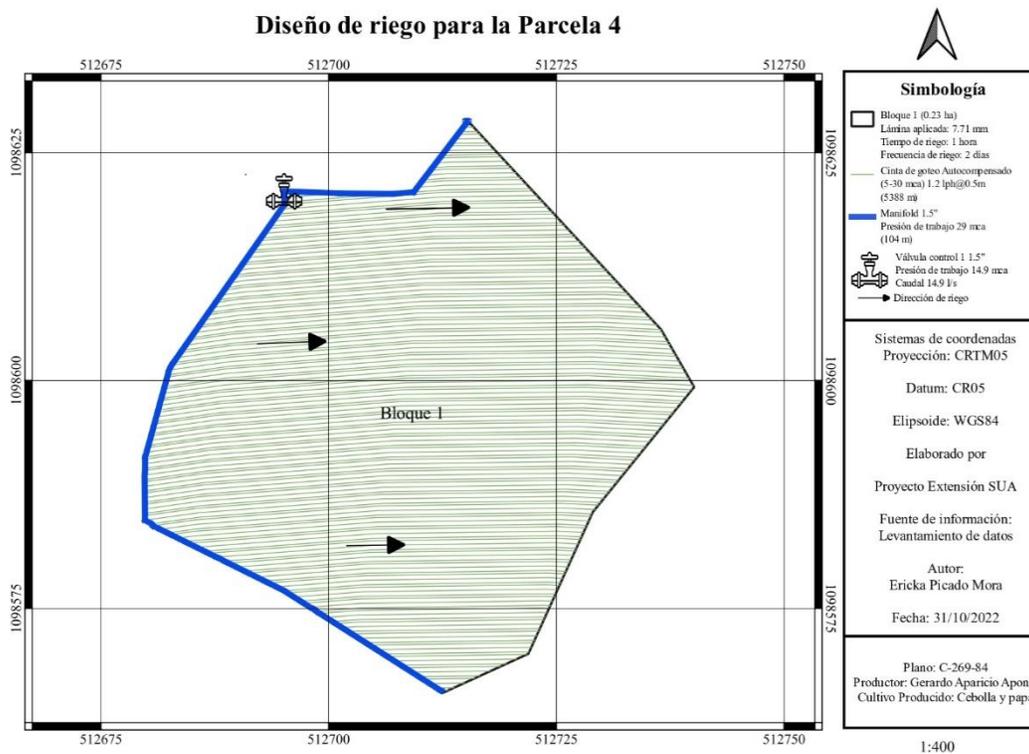


Figura 45. Diseño de riego por goteo Parcela 4. Fuente: Propia.

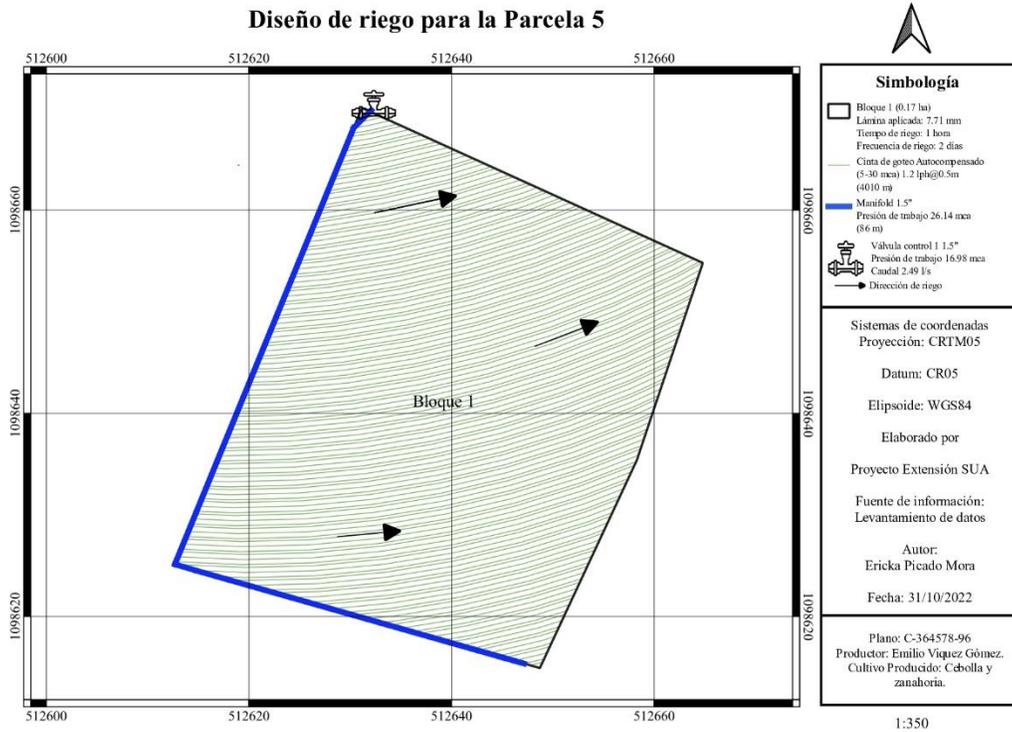


Figura 46. Diseño de riego por goteo Parcela 5. Fuente: Propia.

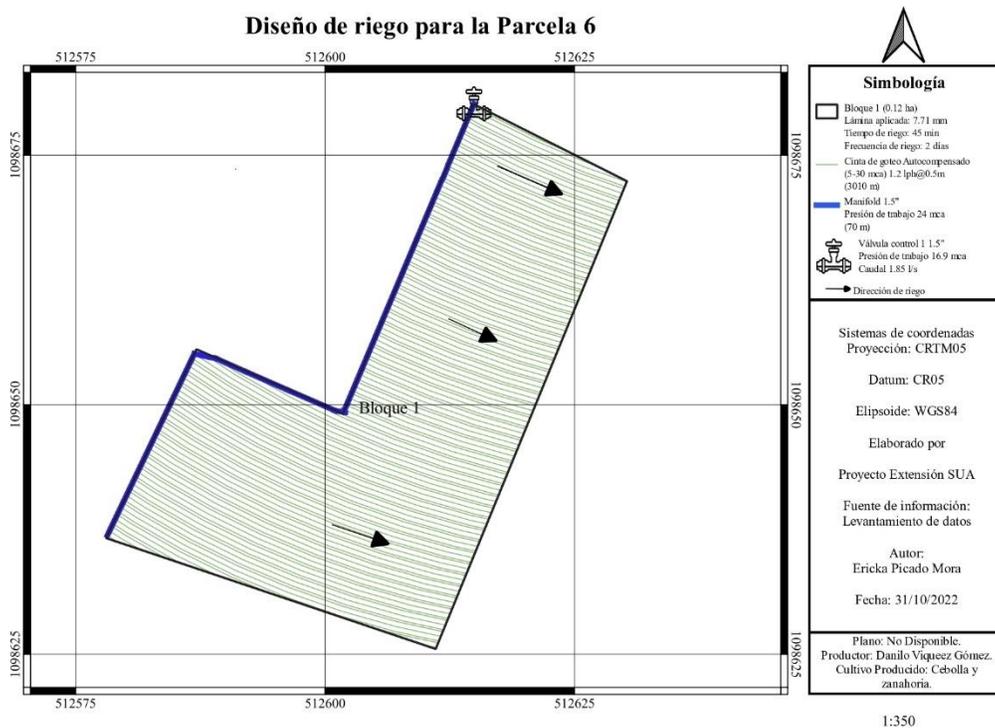


Figura 47. Diseño de riego por goteo Parcela 6. Fuente: Propia.

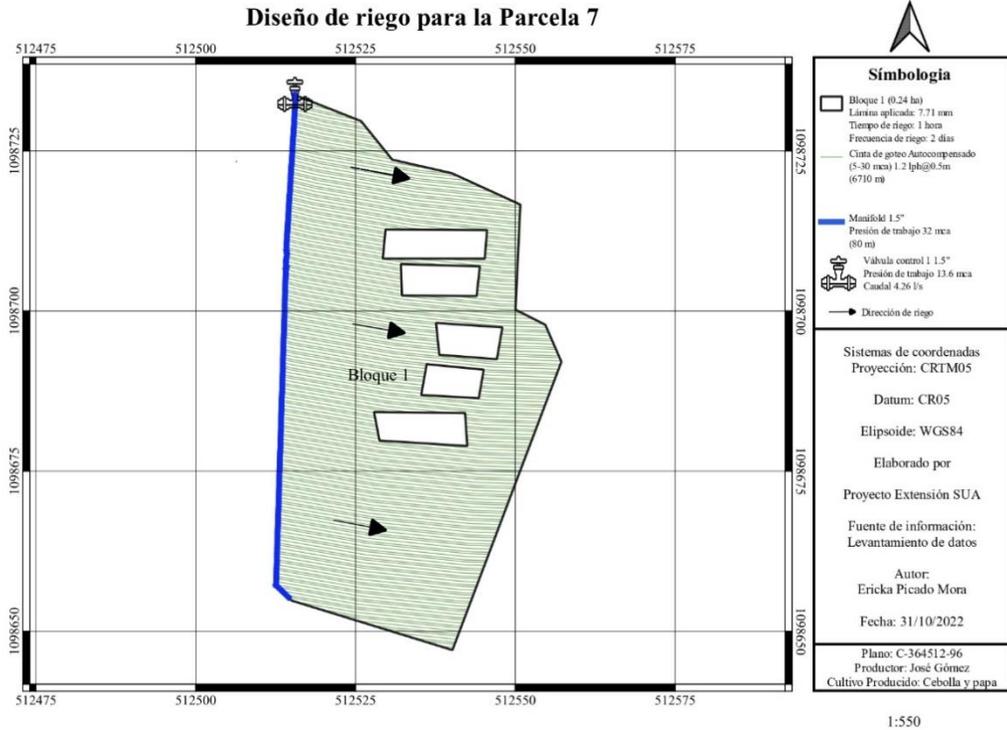


Figura 48. Diseño de riego por goteo Parcela 7. Fuente: Propia.

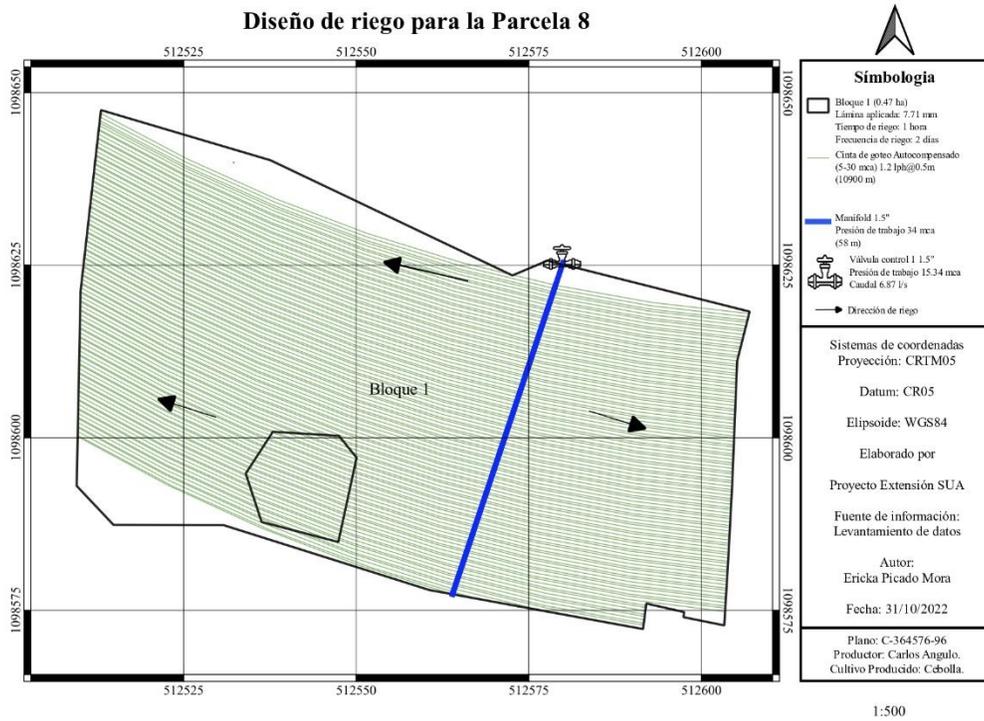


Figura 49. Diseño de riego por goteo Parcela 8. Fuente: Propia.

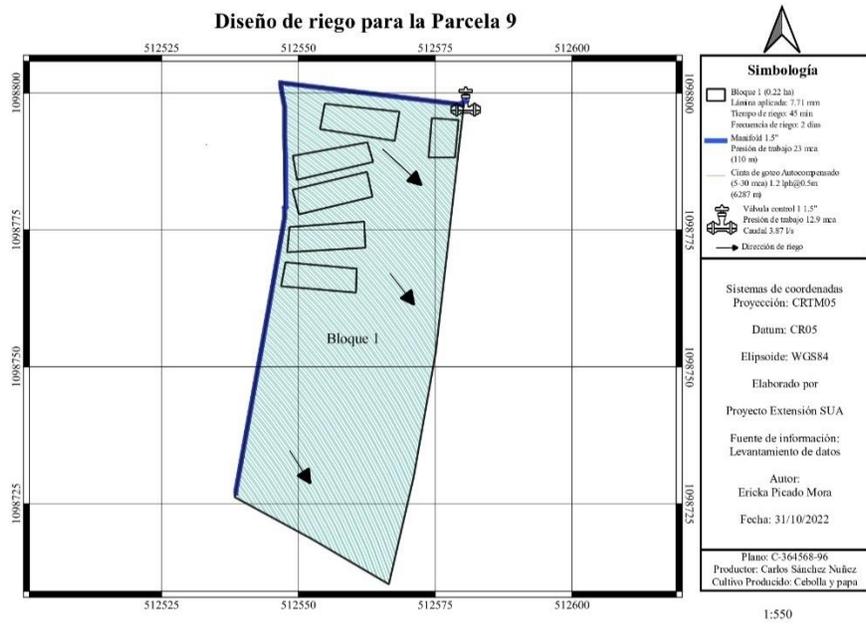


Figura 50. Diseño de riego por goteo Parcela 9. Fuente: Propia.

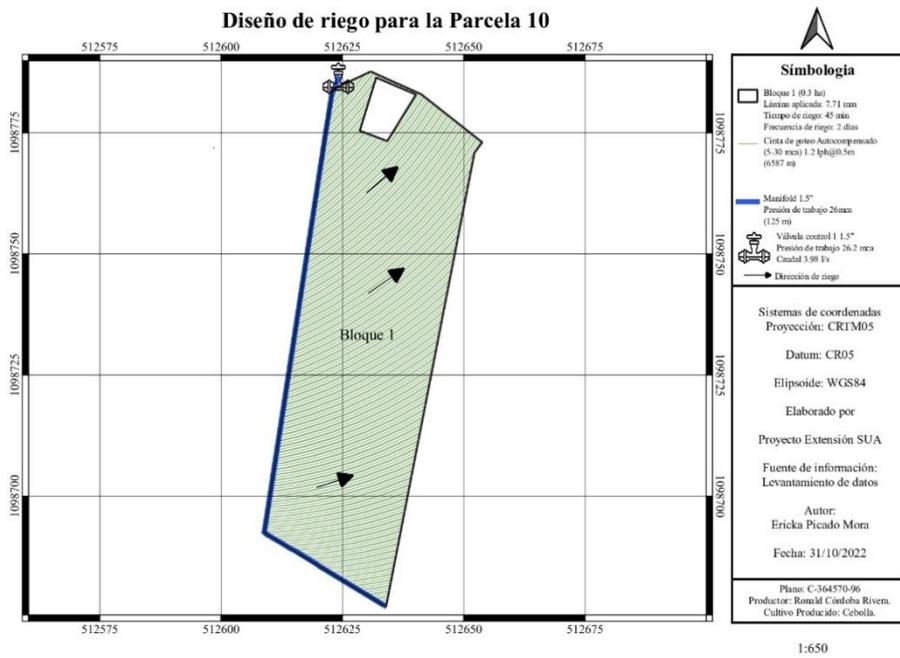


Figura 51. Diseño de riego por goteo Parcela 10. Fuente: Propia.

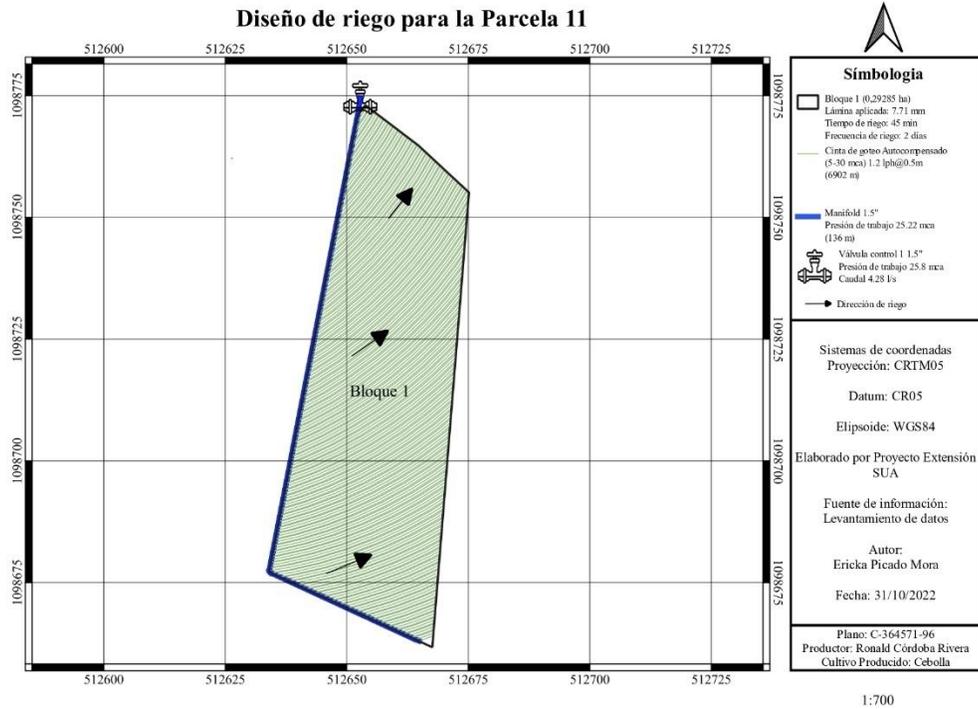


Figura 52. Diseño de riego por goteo Parcela 11. Fuente: Propia.

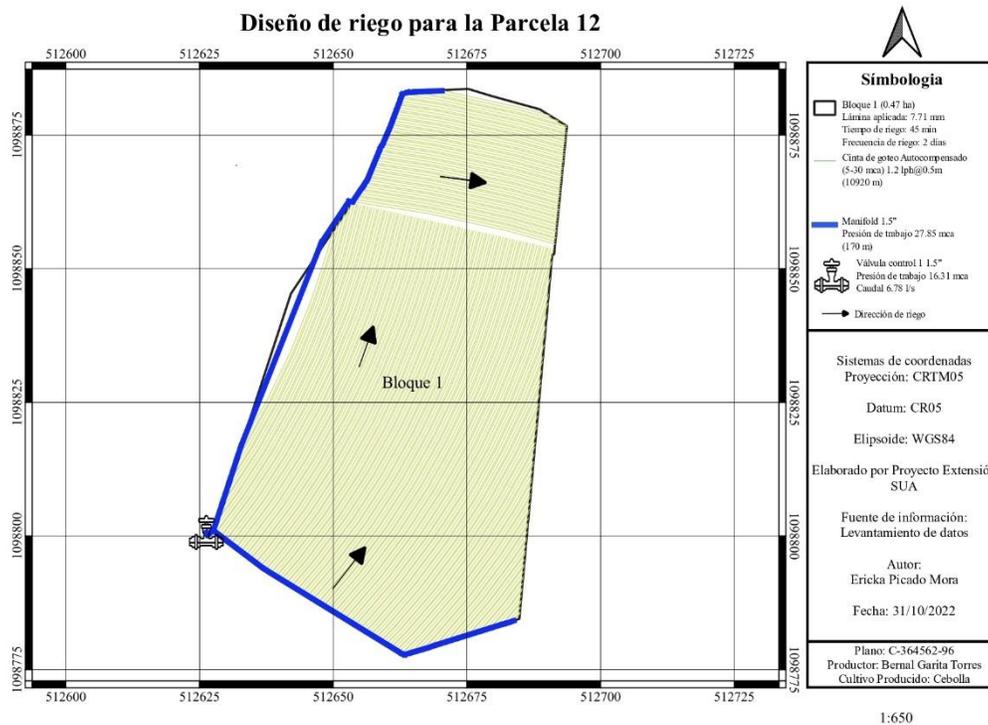


Figura 53. Diseño de riego por goteo Parcela 12. Fuente: Propia.

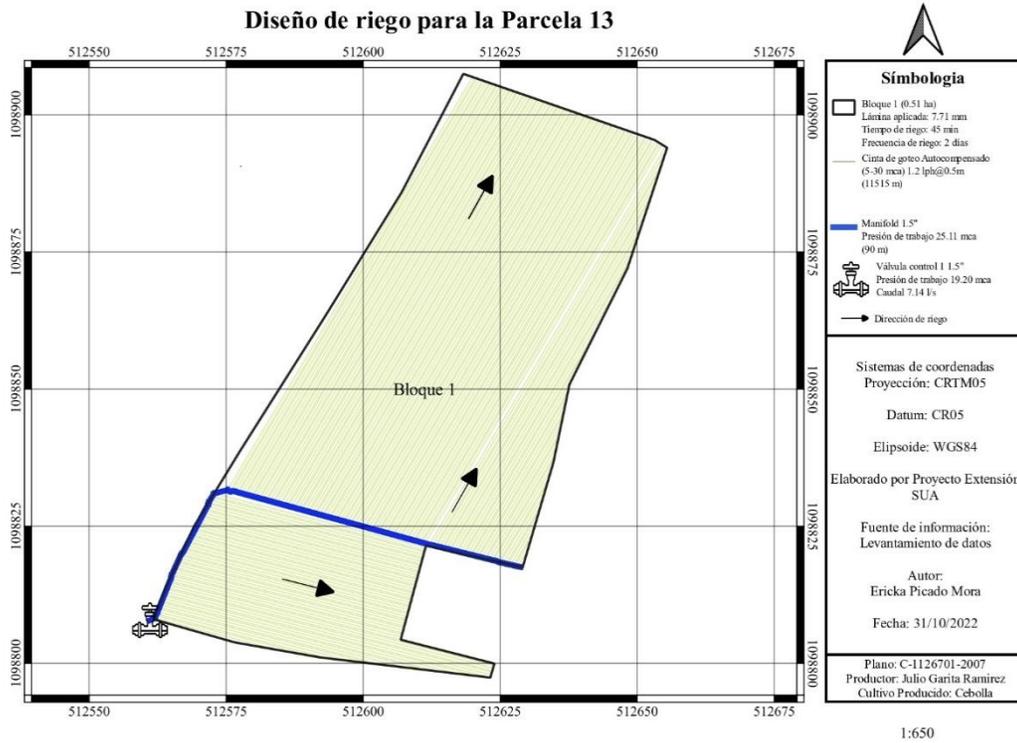


Figura 54. Diseño de riego por goteo Parcela 13. Fuente: Propia.

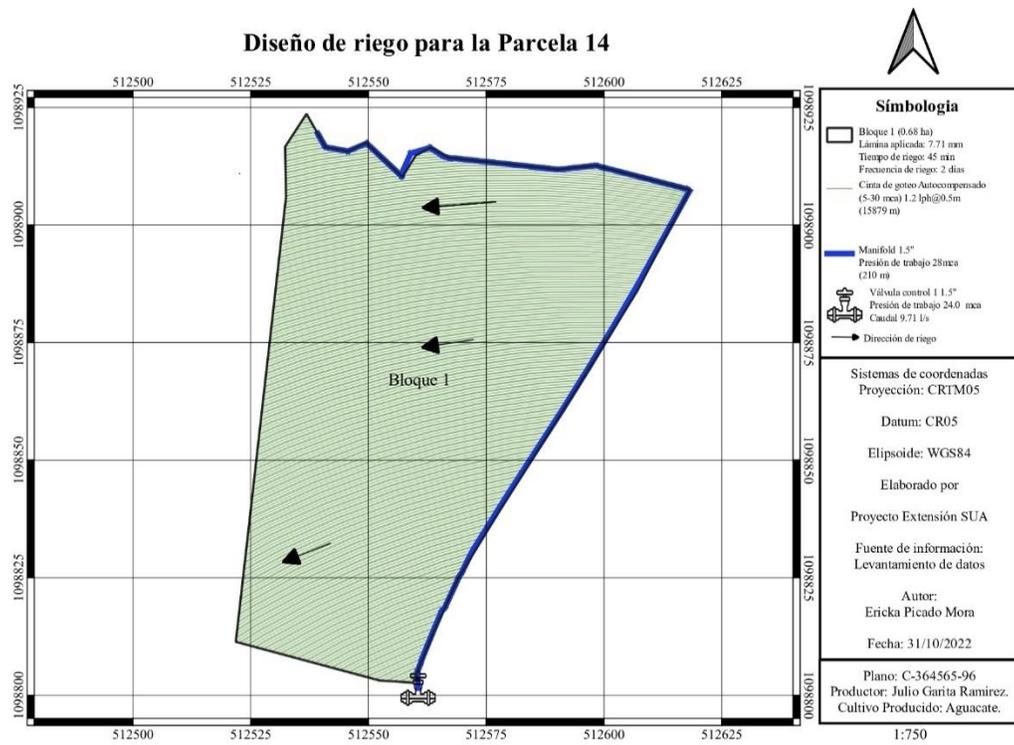


Figura 55. Diseño de riego por goteo Parcela 14. Fuente: Propia.

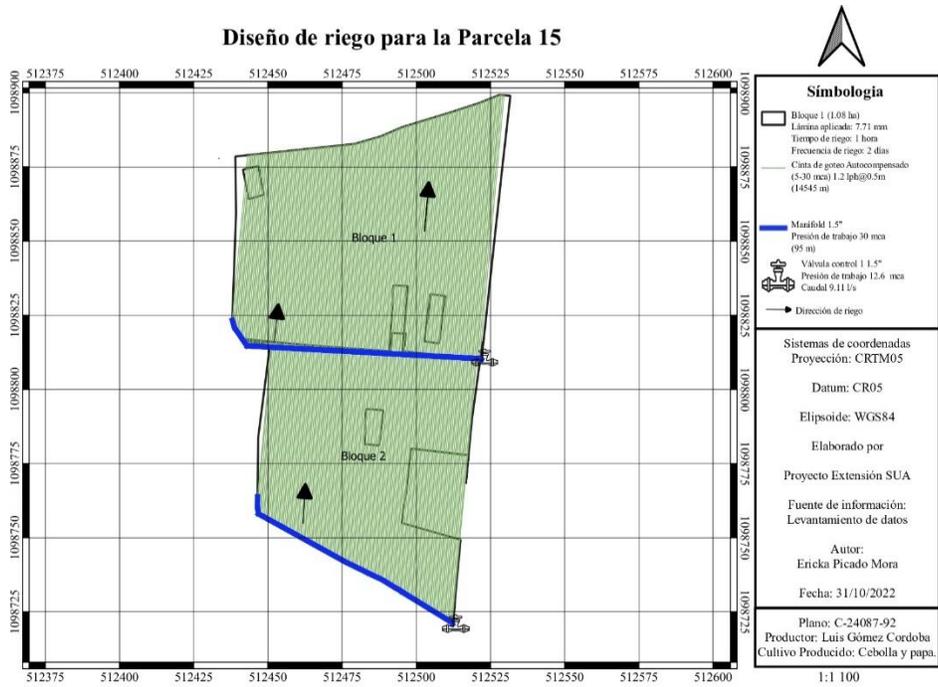


Figura 56. Diseño de riego por goteo Parcela 15. Fuente: Propia.

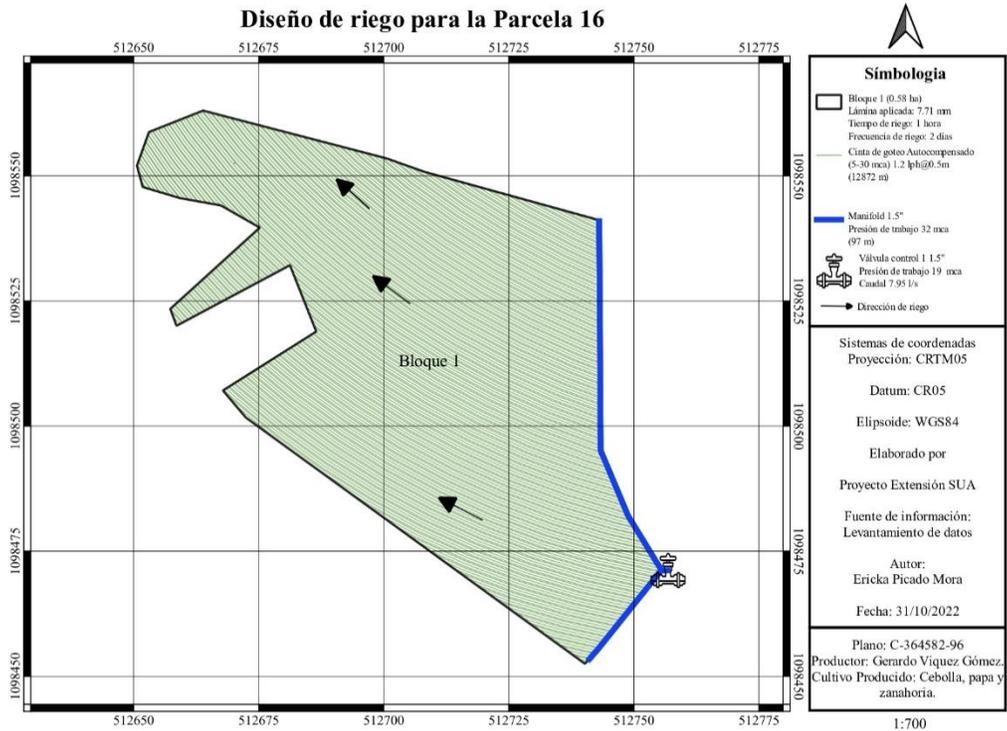


Figura 57. Diseño de riego por goteo Parcela 16. Fuente: Propia.

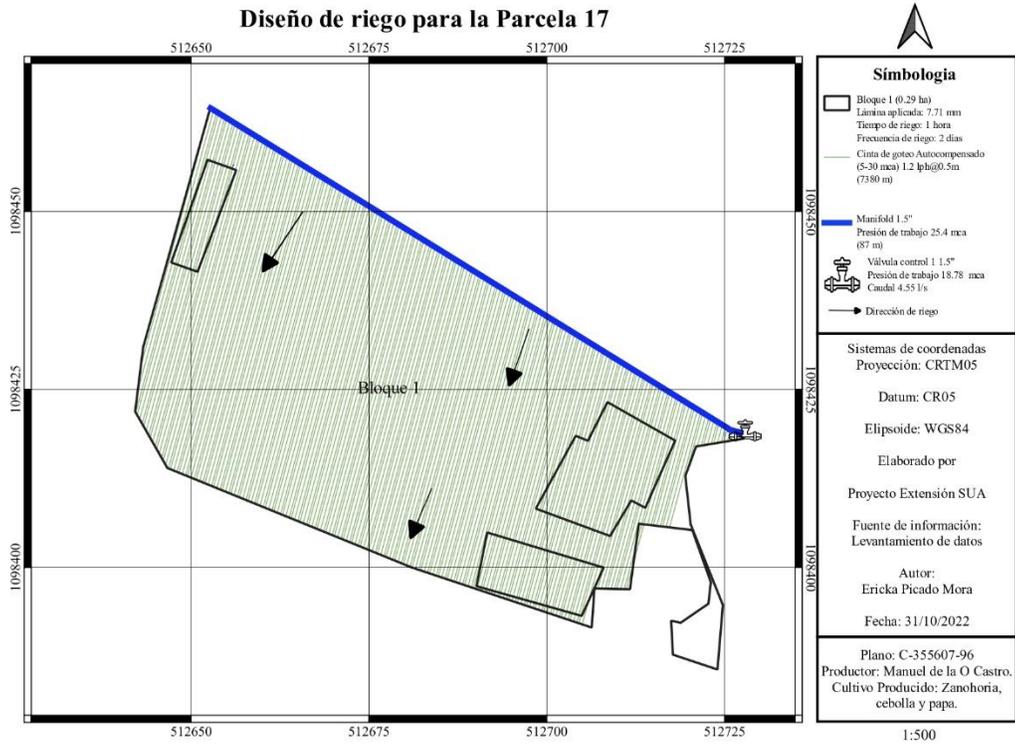


Figura 58. Diseño de riego por goteo Parcela 17. Fuente: Propia.

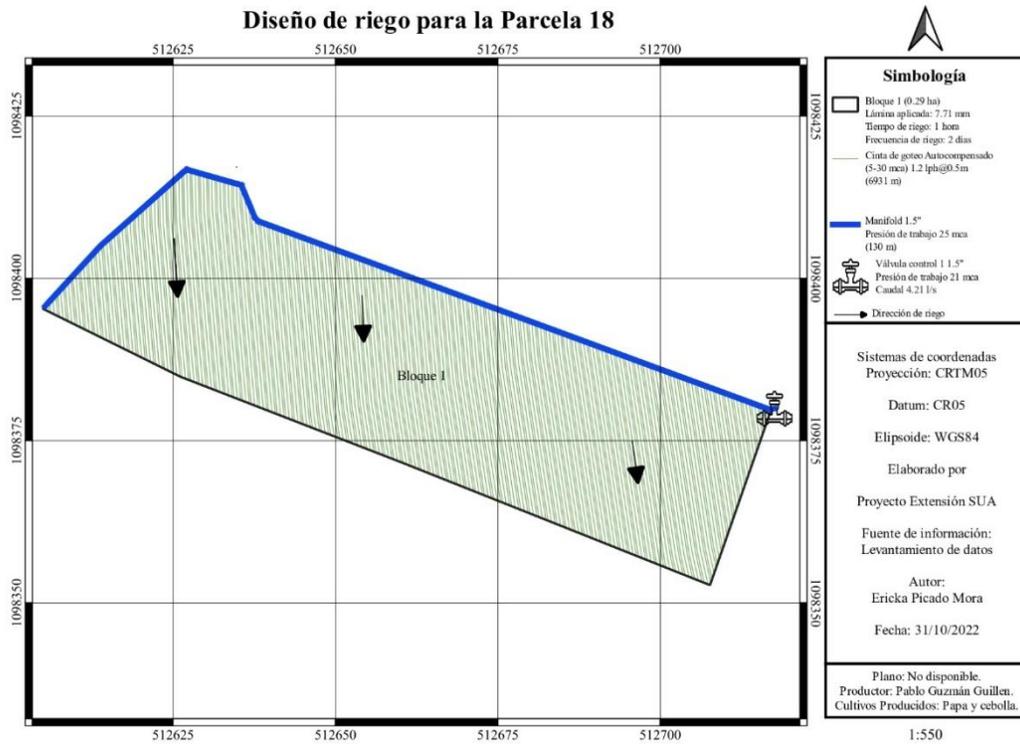


Figura 59. Diseño de riego por goteo Parcela 18. Fuente: Propia.

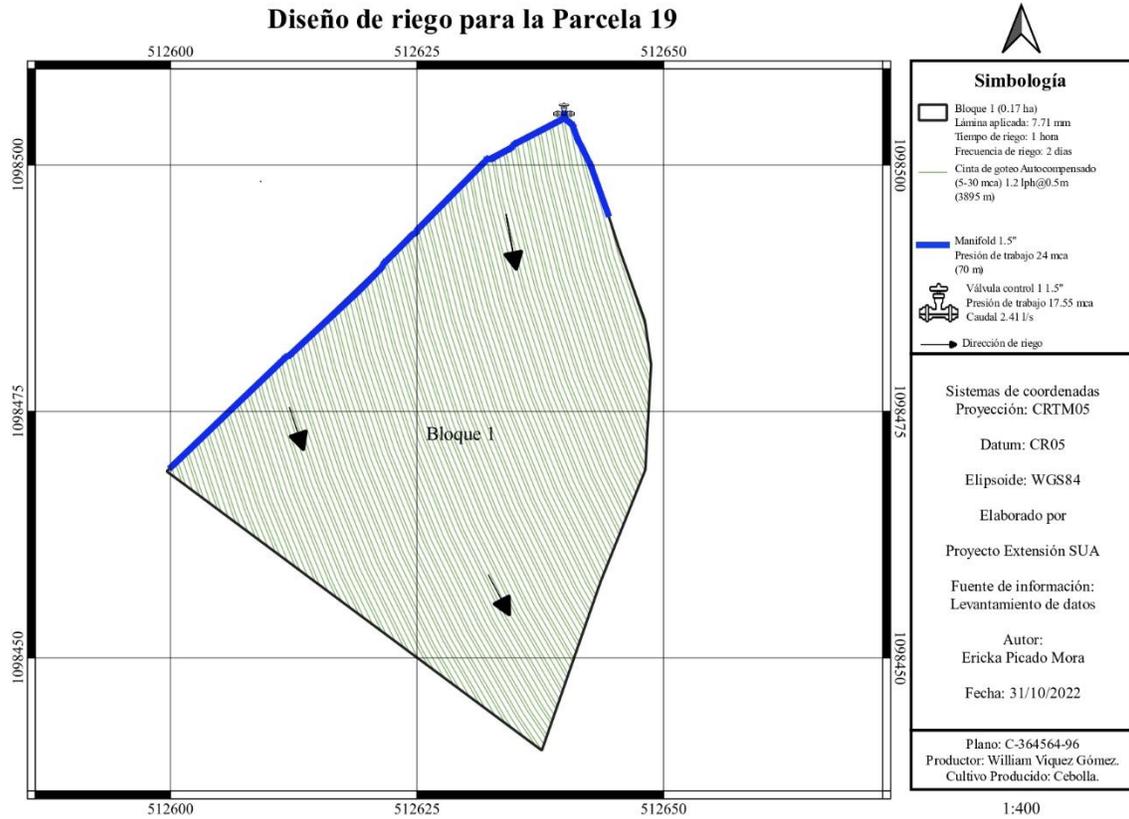


Figura 60. Diseño de riego por goteo Parcela 19. Fuente: Propia.

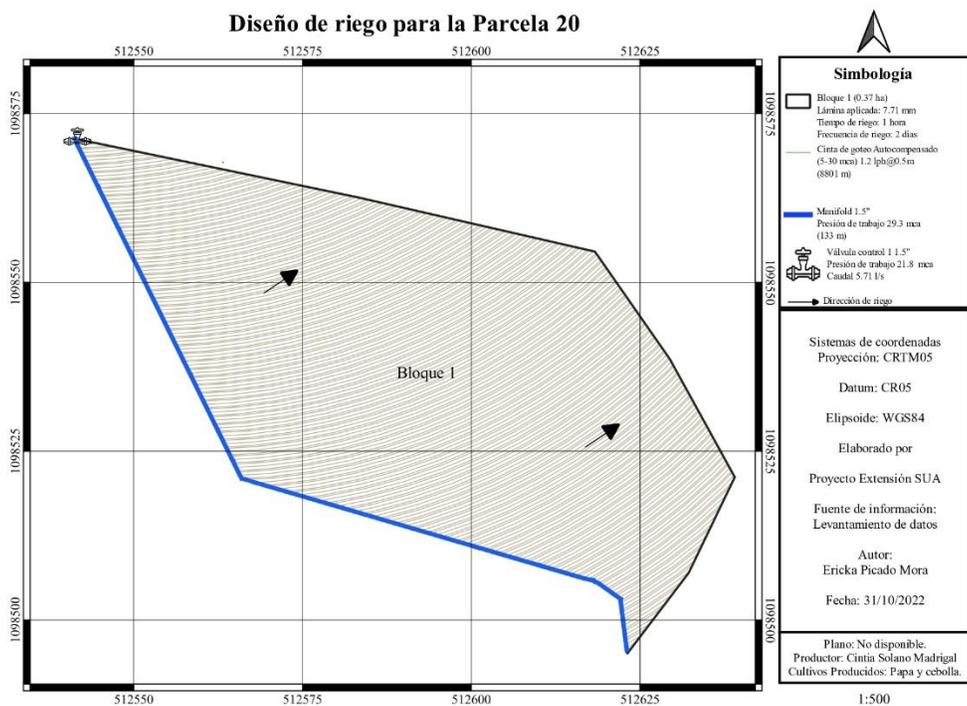


Figura 61. Diseño de riego por goteo Parcela 20. Fuente: Propia.

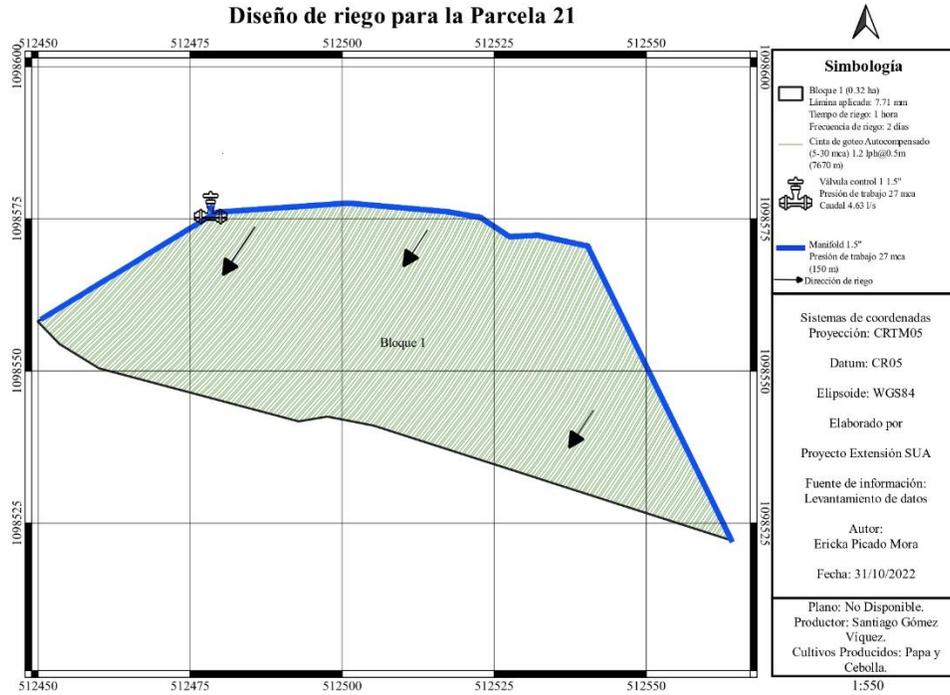


Figura 62. Diseño de riego por goteo Parcela 21. Fuente: Propia.

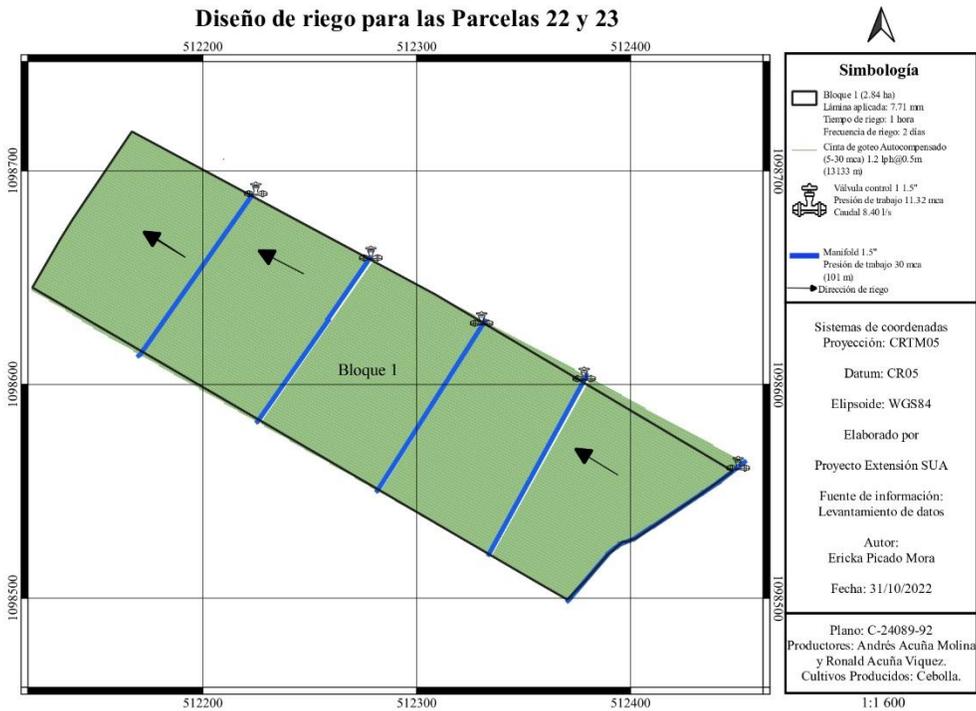


Figura 63. Diseño de riego por goteo Parcela 22 y 23. Fuente: Propia.

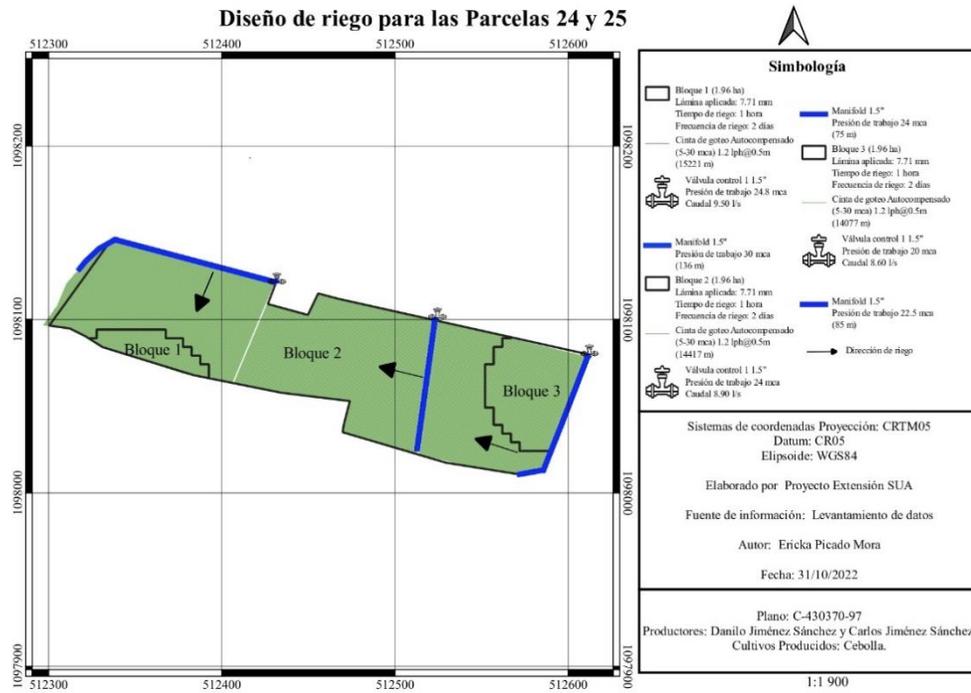


Figura 64. Diseño de riego por goteo Parcela 24 y 25. Fuente: Propia.

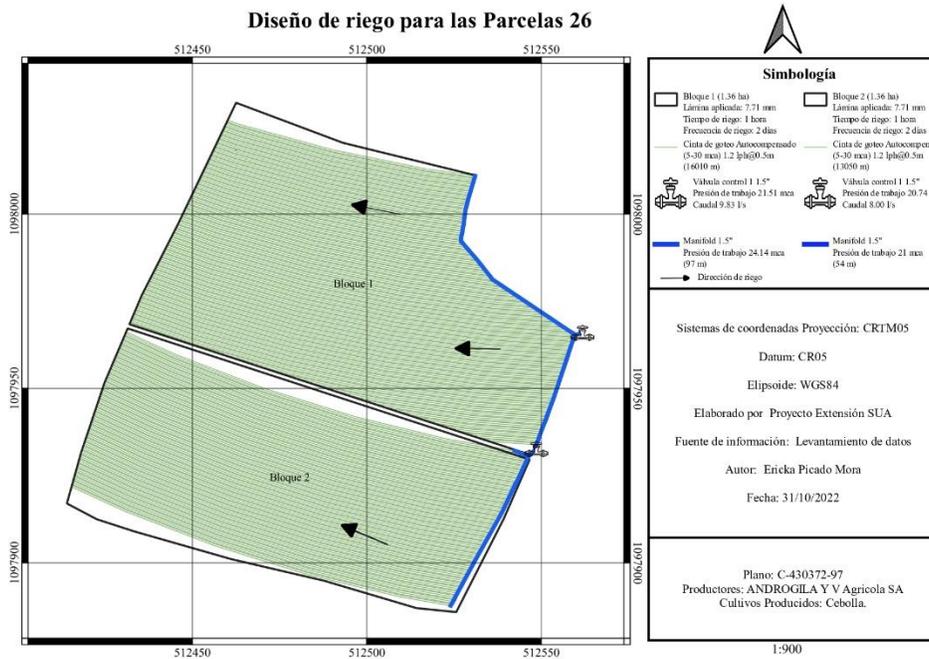


Figura 65. Diseño de riego por goteo Parcela 26. Fuente: Propia.

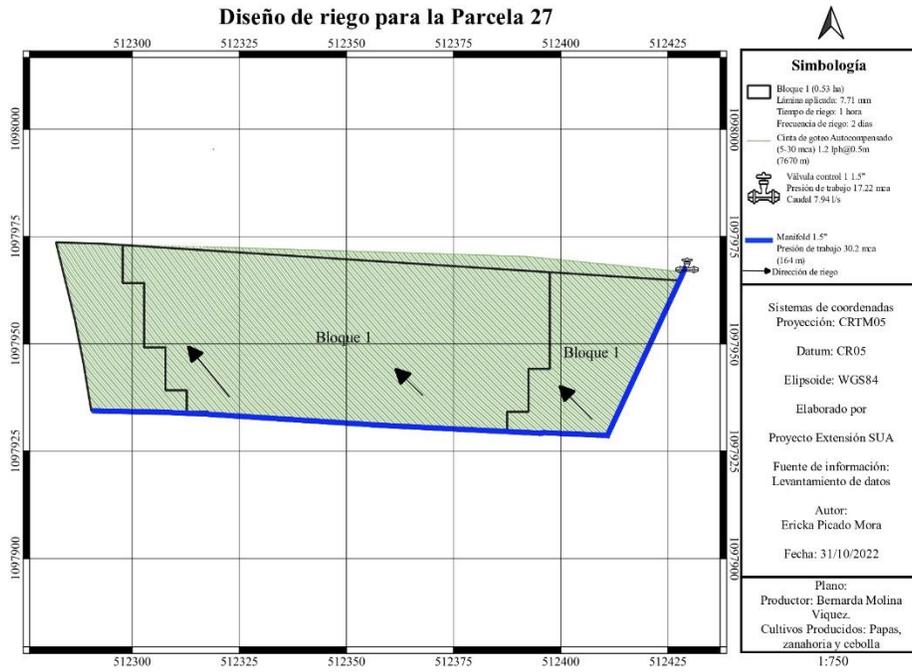


Figura 66. Diseño de riego por goteo Parcela 27. Fuente: Propia.

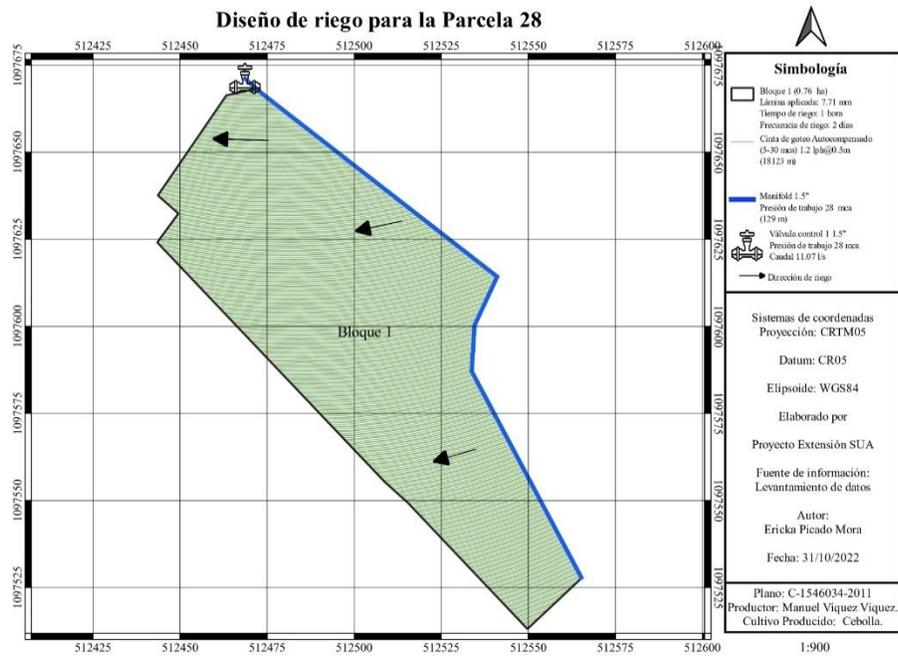


Figura 67. Diseño de riego por goteo Parcela 28. Fuente: Propia.

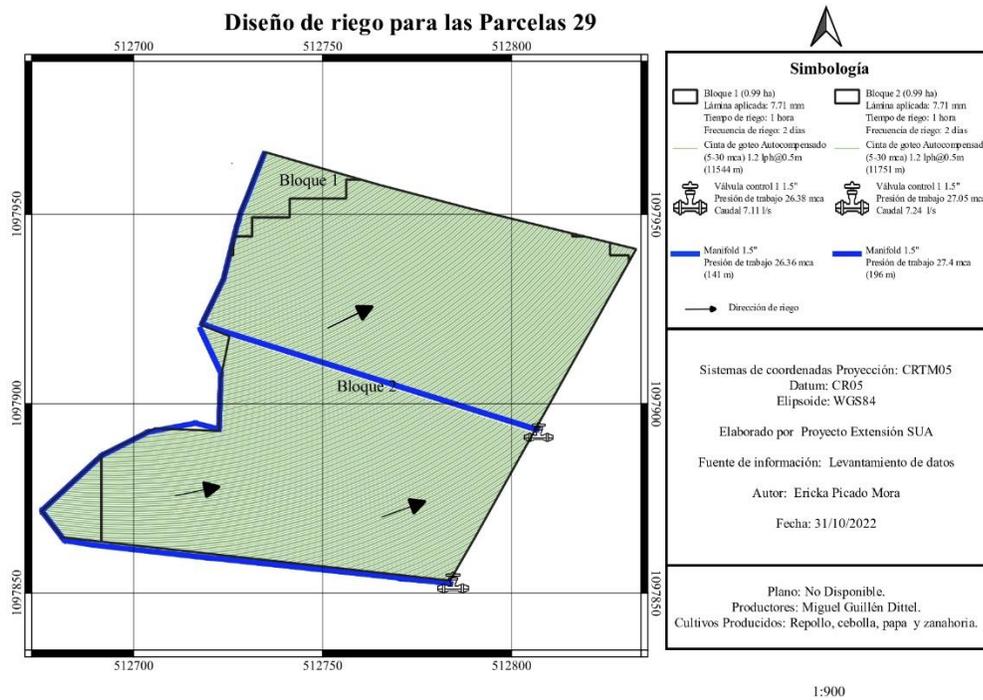


Figura 68. Diseño de riego por goteo Parcela 29. Fuente: Propia.

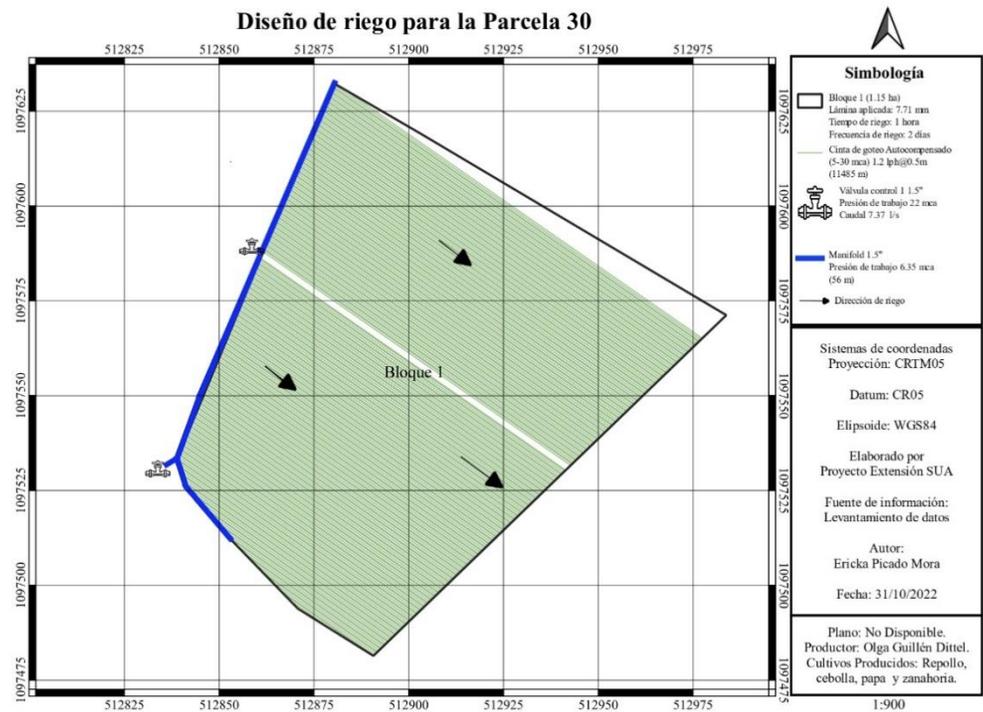


Figura 69. Diseño de riego por goteo Parcela 30. Fuente: Propia.

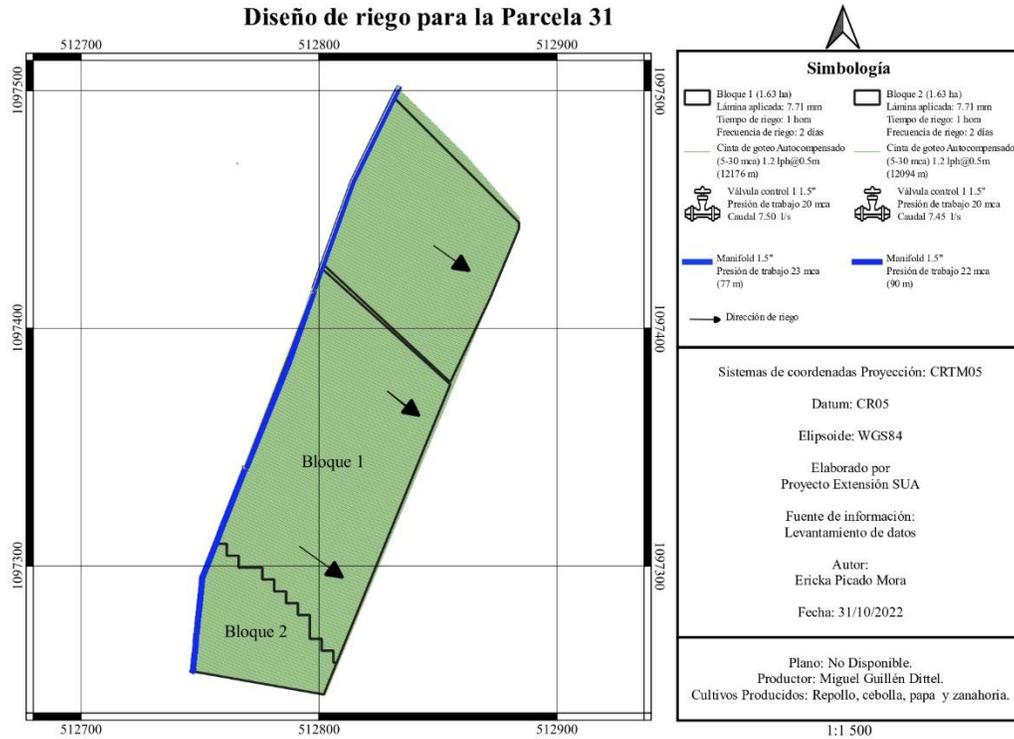


Figura 70. Diseño de riego por goteo Parcela 31. Fuente: Propia.

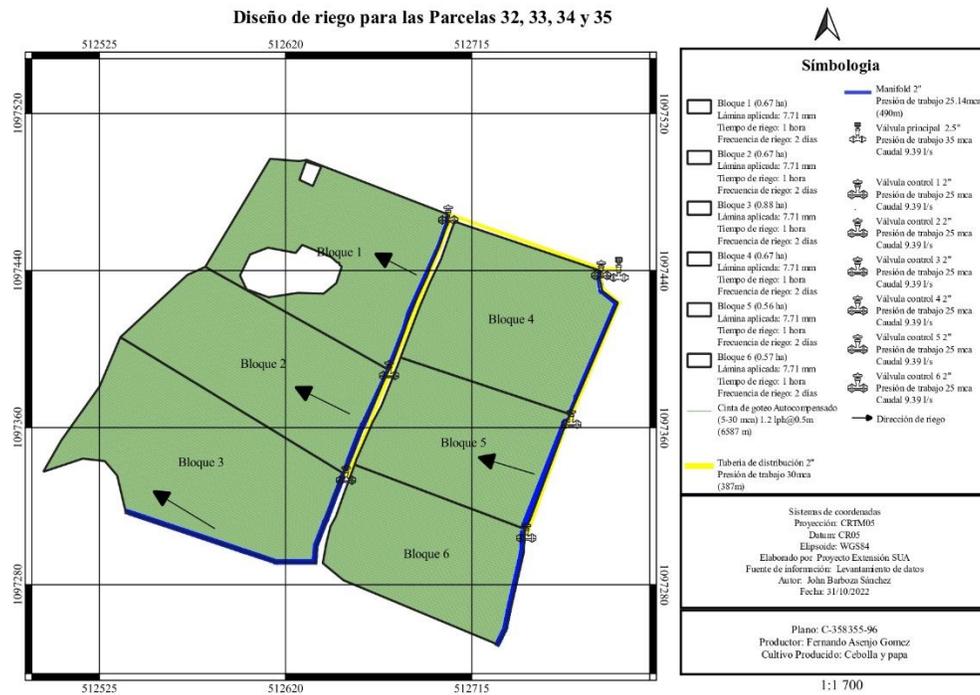


Figura 71. Diseño de riego por goteo Parcela 32, 33, 34 y 35. Fuente: Propia.

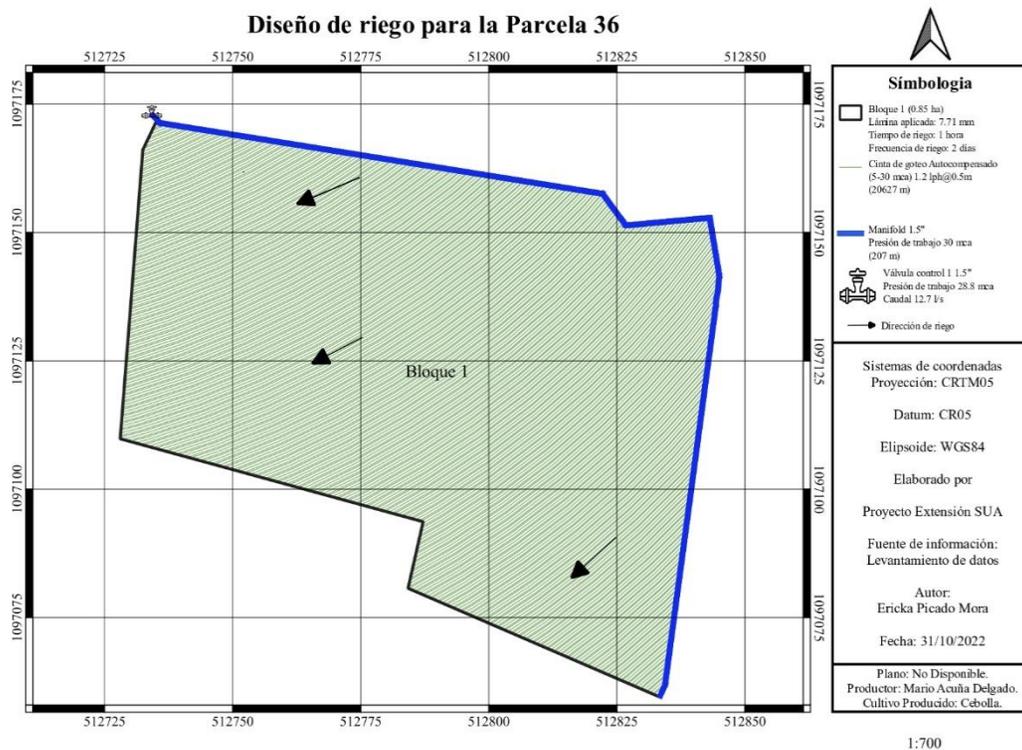


Figura 72. Diseño de riego por goteo Parcela 36. Fuente: Propia.

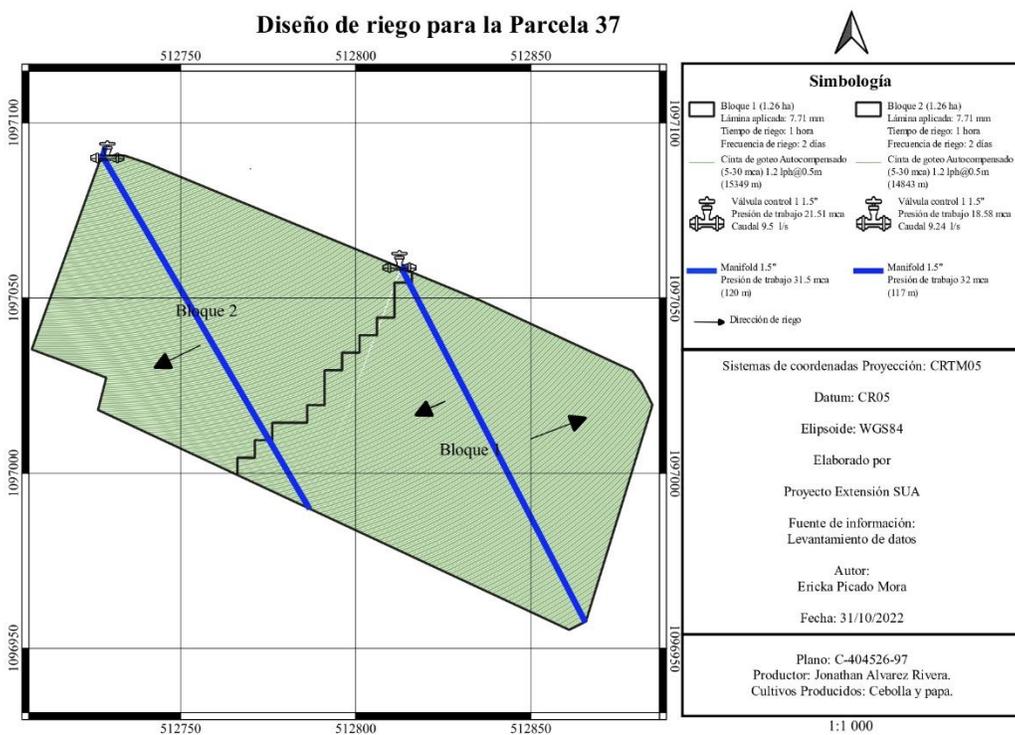


Figura 73. Diseño de riego por goteo Parcela 37. Fuente: Propia.

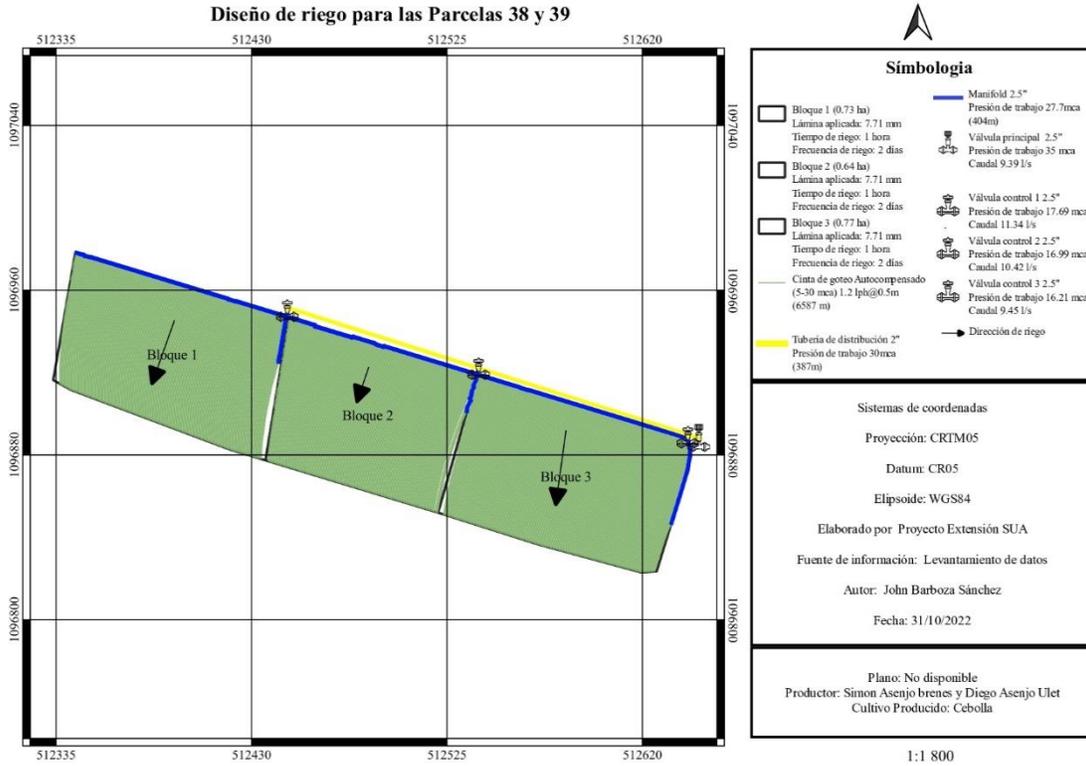


Figura 74. Diseño de riego por goteo Parcela 38 y 39. Fuente: Propia.

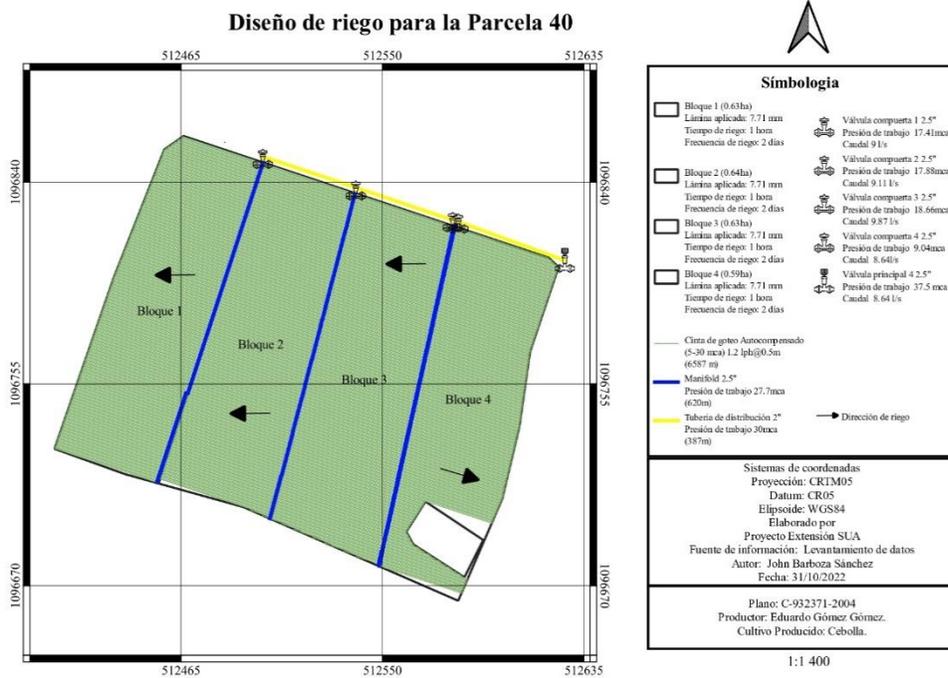


Figura 75. Diseño de riego por goteo Parcela 40. Fuente: Propia.

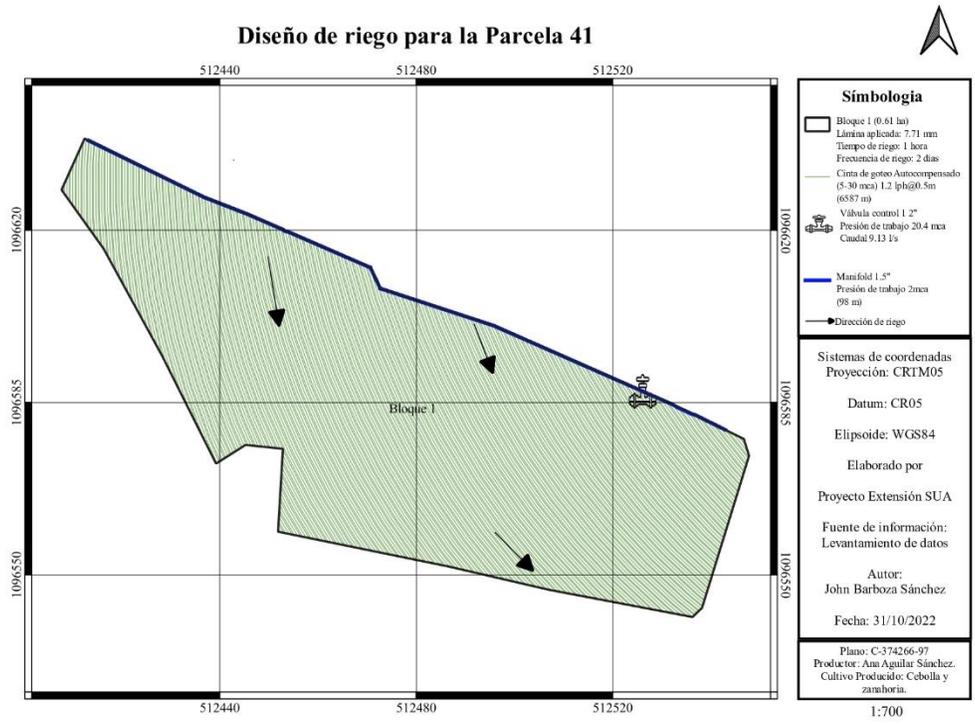


Figura 76. Diseño de riego por goteo Parcela 41. Fuente: Propia.

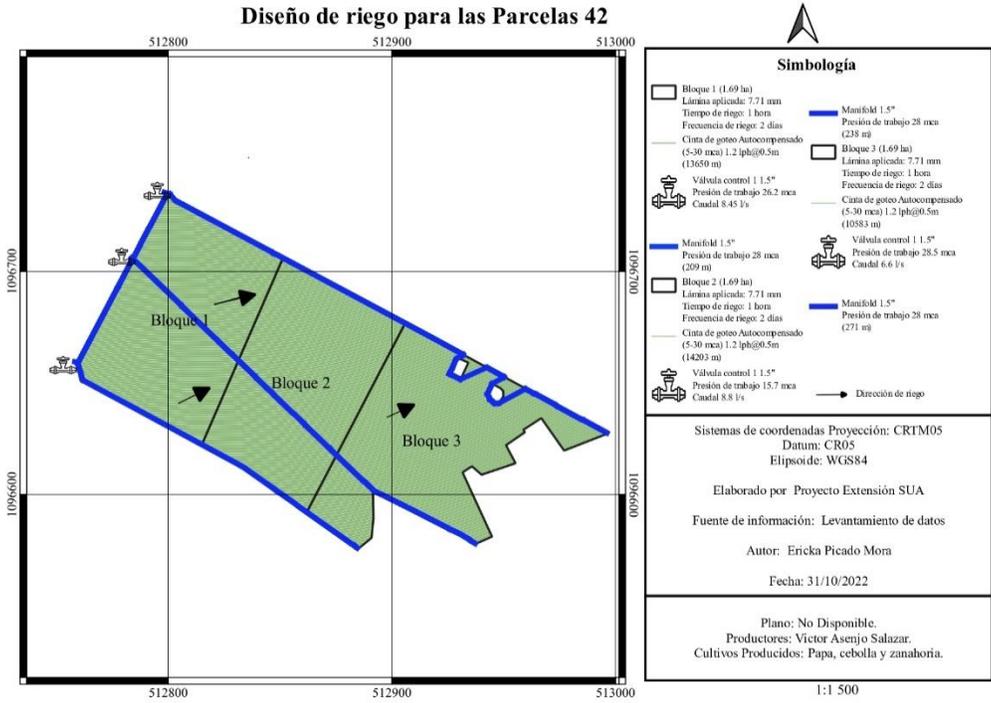


Figura 77. Diseño de riego por goteo Parcela 42. Fuente: Propia.

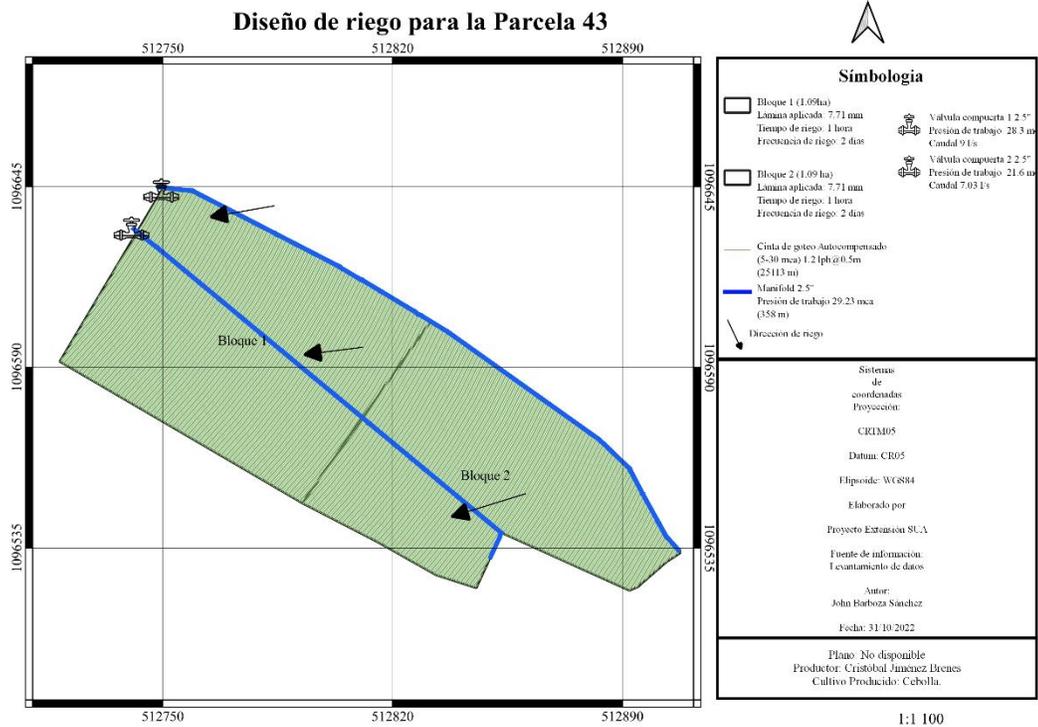


Figura 78. Diseño de riego por goteo Parcela 43. Fuente: Propia.

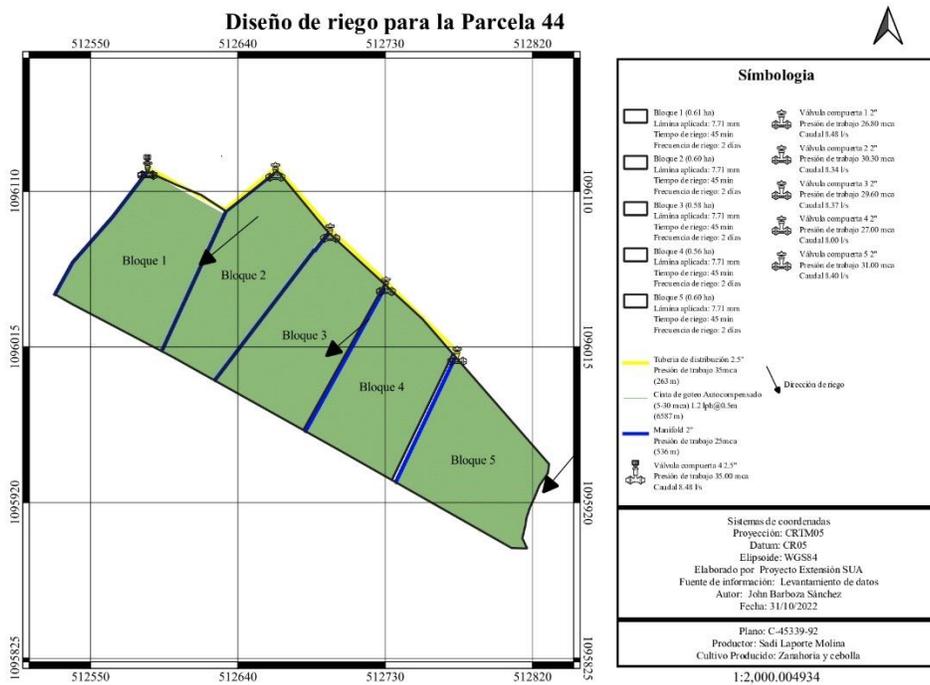


Figura 79. Diseño de riego por goteo Parcela 44. Fuente: Propia.

APENDICE 6. Interpretación de la humedad en el suelo mediante sensores de humedad

Textura	Agua en el suelo		
	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente	Agua disponible
Arenoso	9%	7%	2%
Arenoso franco	14%	10%	4%
Franco Arenoso	18%	8%	9%
Franco	34%	22%	12%
Franco arcilloso	30%	16%	14%
Arcilloso	44%	24%	14%

APENDICE 7. Taller gestión del agua

El Instituto Tecnológico de Costa Rica y la
Corporación Hortícola Nacional les invita al taller:

“Gestión del Agua”

A realizarse los días:

16, 23 y 30 de noviembre Hora: 3:00 pm - 6:00 pm



Salón de Asocagri, Tierra Blanca

Se presentarán los resultados 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”

A cargo de:

Ing. Kerin Romero Calvo, docente de Escuela de Ingeniería Agrícola, TEC
Ing. Milton Solorzano Quintana, docente de Escuela de Ingeniería Agrícola, TEC

Incluye certificado de participación

Confirmación:
Danilo Víquez: 8657 3837




Figura 80. Invitación Taller Gestión del Agua. Fuente: Propia.

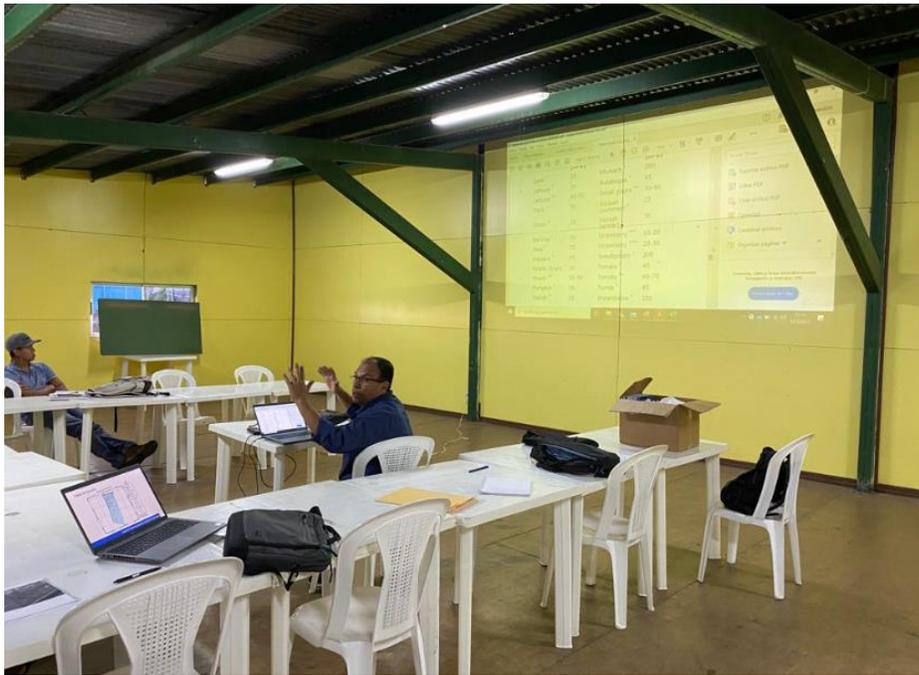


Figura 81. Charla Taller Gestión del Agua. Fuente: Propia.



Figura 82. Exposición Taller Gestión del Agua. Fuente: Propia.