

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



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

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

JULIO CÉSAR ARAYA RODRÍGUEZ

CARTAGO, 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

Julio César Araya Rodríguez

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

Adrián Enrique Chavarría Vidal

Nombre

Asesor - Lector

Isabel Guzmán Arias

Nombre

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2021



Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ACTA DE CALIFICACION DE TRABAJOS DE GRADUACION

A las 15:30 horas del día 18 del mes de Noviembre del año 2021 estudiante:
Julio César Araya Rodríguez

presenta y defiende su ,presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:

Diseño de dos sistemas de riego por goteo para café, en diferentes unidades experimentales para productores de café en los cantones de Naranjo y Grecia, en Alajuela

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

Presidente (a): Laura Segura

Asesor (a) de la Escuela: Adrián Chavarría

Asesor (a) Externo (a): Pedro Pereira

Se le confiere la nota de 90 y firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos

Finales de Graduación:

LAURA PATRICIA SERRANO (FIRMA) Firmado digitalmente por
LAURA PATRICIA SEGURA
SERRANO (FIRMA)
Fecha: 2021.11.19
08:39:13 -06'00'

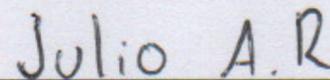
PRESIDENTE (A)

ADRIAN ENRIQUE CHAVARRIA VIDAL (FIRMA) Firmado digitalmente
por ADRIAN ENRIQUE
CHAVARRIA VIDAL
(FIRMA)
Fecha: 2021.11.18
20:51:04 -06'00'

ASESOR (A) DE LA ESCUELA



ASESOR (A) EXTERNA(A)



ESTUDIANTE

Dedicatoria

A mis padres, Orlando Araya y Shirley Rodríguez, quienes me han brindado su apoyo incondicional y siempre han confiado en mí.

A mis hermanos, David Araya R, Daniela Araya R, Pablo Araya R y Fabricio Araya R, que han sido una motivación para seguir adelante.

A mi novia, Daniela Montero B, que me ha acompañado durante 11 semestres y me ha apoyado en todo momento con mucho amor.

Agradecimientos

A mis padres, mis hermanos y mi novia, porque sin ellos no sería la persona que soy hoy.

A mis compañeras y amigas, Rosmery Quesada C y Valeria Serrano N, que me recibieron, sin conocerme, en su grupo de trabajo de Mecánica de Fluidos Aplicada en el quinto semestre y desde ese día nos hemos acompañado y apoyado, con ellas aprendí mucho.

A cada una de las personas que conocí en la universidad y se convirtieron en amigos que están para brindar su apoyo en todo momento.

A la empresa FJ Orlich & Hnos. Ltda. y a cada uno de los miembros, que me dieron un espacio en sus agendas para acompañarme en diferentes etapas del proyecto, junto con ellos a los productores Tomás Gutiérrez Acuña y German Guerrero Mejía que me abrieron las puertas de sus propiedades para el desarrollo del proyecto.

A los amigos que me ha dado la vida y quienes le dan vida a los días.

A la vida que me ha permitido estar donde estoy, que me ha dado muchas oportunidades de crecimiento.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1 RESUMEN	viii
2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
3 REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1 Café	6
3.1.1 Altitud	7
3.1.2 Precipitación	7
3.1.3 Temperatura	8
3.1.4 Humedad relativa	8
3.1.5 Viento	8
3.1.6 Distancia de siembra	8
3.1.7 Pendiente	8
3.1.8 Riego	9
3.1.9 Afectación por cambio climático	9
3.2 Suelo	10
3.2.1 Textura	10
3.2.2 Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)	11
3.3 Condiciones agroclimáticas	12
3.3.1 Evapotranspiración (Et)	12
3.3.2 Evapotranspiración potencial (Eto)	12
3.3.3 Evapotranspiración de cultivo (Etc)	12

3.3.4	Coeficiente de cultivo (Kc).....	12
3.4	Riego por goteo.....	13
3.5	Red de conducción.....	13
3.5.1	Tuberías.....	14
3.5.2	Accesorios.....	14
3.6	Válvulas.....	15
3.6.1	Tipos de válvulas.....	16
3.7	Filtrado.....	22
3.7.1	Tipos de filtros.....	22
3.8	Bombeo.....	26
3.9	Mecánica de fluidos.....	27
3.9.1	Pérdidas de carga.....	27
3.9.2	Golpe de ariete.....	28
3.10	Hidrometría.....	28
3.10.1	Aforos.....	28
3.11	Análisis ambiental.....	29
3.12	Análisis económico.....	30
4	METODOLOGÍA.....	31
4.1	Evaluación de condiciones iniciales.....	32
4.2	Condiciones topográficas.....	32
4.2.1	Levantamiento topográfico.....	32
4.2.2	Procesamiento de datos.....	32
4.3	Fuentes de agua.....	33
4.4	Análisis físico de suelos.....	35

4.4.1	Muestreo	35
4.4.2	Análisis de muestras	35
4.5	Condiciones climáticas.....	36
4.6	Propuestas de diseño	36
4.6.1	Diseño agronómico	36
4.6.2	Diseño hidráulico.....	42
4.7	Análisis económico	49
4.8	Análisis ambiental.....	50
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
5.1	Unidad experimental T.....	52
5.1.1	Ubicación del proyecto	52
5.1.2	Condiciones iniciales	52
5.1.3	Condiciones topográficas.....	53
5.1.4	Fuente de agua	54
5.1.5	Análisis físicos de suelo.....	54
5.1.6	Condiciones climáticas	55
5.1.7	Diseño agronómico	55
5.1.8	Diseño hidráulico.....	56
5.1.9	Análisis económico.....	61
5.1.10	Análisis ambiental.....	62
5.2	Unidad experimental G	62
5.2.1	Ubicación del proyecto	62
5.2.2	Condiciones iniciales	63
5.2.3	Condiciones topográficas.....	63

5.2.4	Fuente de agua	65
5.2.5	Análisis físicos de suelo.....	66
5.2.6	Condiciones climáticas	66
5.2.7	Diseño agronómico.....	67
5.2.8	Diseño hidráulico.....	68
5.2.9	Análisis económico.....	73
5.2.10	Análisis ambiental.....	74
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
6.1	Conclusiones	76
6.2	Recomendaciones.....	77
7	BIBLIOGRAFÍA	78
8	ANEXOS	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1	Distancia de siembra recomendada para el café según precipitaciones.....	8
Cuadro 3.2	Coefficiente de cultivo Kc para el cultivo de café, por etapas	13
Cuadro 3.3	Tipo de filtro según el material que se desee separar.....	26
Cuadro 5.1	Caudal de la fuente de abastecimiento de la unidad experimental T	54
Cuadro 5.2	Datos del suelo para la unidad experimental T	54
Cuadro 5.3	Eto para el mes de mayo en la unidad experimental T	55
Cuadro 5.4	Profundidad, agotamiento, PAR y E _{tg} para la unidad experimental T	55
Cuadro 5.5	Resultados del diseño agronómico sin redondear para la unidad experimental T	56
Cuadro 5.6	Resultados del diseño agronómico para la unidad experimental T.....	56
Cuadro 5.7	Pendiente en los laterales para la unidad experimental T	57
Cuadro 5.8	Pendiente para cada una de las múltiples en la unidad experimental T	58
Cuadro 5.9	Cinta de riego para la unidad experimental T	58
Cuadro 5.10	Diámetro nominal y presión de operación de cada múltiple en la unidad experimental T	58
Cuadro 5.11	Dimensiones recomendadas para reservorio en unidad experimental T.....	59
Cuadro 5.12	Diámetro nominal y presión de operación de la tubería desde el reservorio hasta cada una de las múltiples	59
Cuadro 5.13	Características requeridas para el equipo de bombeo	60
Cuadro 5.14	Características de la bomba seleccionada	60
Cuadro 5.15	Equipo de filtrado y válvulas recomendadas	60
Cuadro 5.16	Resumen flujo de efectivo unidad experimental T	61
Cuadro 5.17	Indicadores financieros para diseño en unidad experimental T	62
Cuadro 5.18	Resultados tras aplicar formulario D1 de la SETENA.....	62
Cuadro 5.19	Caudal de la fuente de abastecimiento para la unidad experimental G.....	66
Cuadro 5.20	Datos del suelo para la unidad experimental G.....	66
Cuadro 5.21	Eto para el mes de mayo en la unidad experimental G	67
Cuadro 5.22	Profundidad, agotamiento, PAR y E _{tg} para la unidad experimental G	67
Cuadro 5.23	Resultados del diseño agronómico sin redondear para la unidad experimental G	67

Cuadro 5.24	Resultados del diseño agronómico para la unidad experimental G	68
Cuadro 5.25	Pendiente en los laterales para la unidad experimental G.....	69
Cuadro 5.26	Pendiente para la múltiple en la unidad experimental G.....	70
Cuadro 5.27	Cinta de riego para la unidad experimental G.....	70
Cuadro 5.28	Diámetros nominales y presiones de trabajo de las diferentes múltiples.....	70
Cuadro 5.29	Diámetro nominal y presiones de trabajo de la tubería desde el tanque hasta la múltiple	71
Cuadro 5.30	Características requeridas para el equipo de bombeo	71
Cuadro 5.31	Características de la bomba seleccionada	71
Cuadro 5.32	Tubería de conducción desde la bomba al tanque.....	72
Cuadro 5.33	Equipo de filtrado y válvulas recomendadas	72
Cuadro 5.34	Resumen flujo de efectivo unidad experimental G.....	73
Cuadro 5.35	Indicadores financieros para diseño en unidad experimental G.....	73
Cuadro 5.36	Resultados tras aplicar formulario D1 de la SETENA.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 Sistema radicular de la planta de café.....	7
Figura 3-2 Triángulo de texturas según distribución de partículas.....	11
Figura 3-3 Diagrama de pérdidas de presión	16
Figura 3-4 Válvula de aguja.....	17
Figura 3-5 Válvula de compuerta	17
Figura 3-6 Válvula de mariposa.....	18
Figura 3-7 Válvula antirretorno	19
Figura 3-8 Válvula reguladora de presión	19
Figura 3-9 Válvula de aire trifuncional.....	20
Figura 3-10 Válvula de alivio de presión.....	21
Figura 3-11 Válvula sostenedora de presión.....	21
Figura 3-12 Válvula de retrolavado	22
Figura 3-13 Filtro hidrociclón.....	23
Figura 3-14 Filtro de grava	24
Figura 3-15 Filtro de malla	25
Figura 3-16 Filtros de anillas	25
Figura 3-17 Hidrómetro de eje horizontal	29
Figura 5-1 Área de diseño, unidad experimental T	52
Figura 5-2 Curvas de nivel en área de diseño, unidad experimental T.....	53
Figura 5-3 Bloques de riego para la unidad experimental T.....	57
Figura 5-4 Área de diseño, unidad experimental G	63
Figura 5-5 Curvas de nivel en área de diseño, unidad experimental G	64
Figura 5-6 Curvas de nivel desde fuente hasta área de diseño, unidad experimental G.....	65
Figura 5-7 Bloque de riego para la unidad experimental G.....	69

1 RESUMEN

Se diseñó el sistema de riego por goteo y red de distribución, uno para la unidad experimental T ubicada en San José de Naranjo y otro para la unidad experimental G ubicada en San José de Grecia, con el fin de asegurar la lámina de agua necesaria para el café en la etapa de floración, ya que, si este tiene deficiencias hídricas en dicha etapa puede presentar una reducción significativa en su cosecha.

Para el desarrollo de cada diseño, se realizó cada análisis necesario y se logró identificar las particularidades de cada unidad experimental, una vez que se tuvo cada análisis se realizó el diseño agronómico e hidráulico capaz de cubrir las necesidades de cada unidad experimental.

Finalmente se analizó cada sistema desde el punto de vista económico, en ambos casos se obtuvo que son rentables, además se logró identificar que la topografía y la fuente de agua tienen el mayor impacto en los costos de la unidad experimental T, y para la unidad experimental G disposición de la fuente generó mayor impacto en los costos. Desde el punto de vista ambiental, se determinó que ninguna de las propuestas genera un impacto significativo.

Palabras clave: Diseño, Riego, Goteo, Café, Análisis.

Two drip irrigation systems with their respective distribution networks were designed for coffee plantations, one for a plot in San Jose de Naranjo (experimental unit T) and the second for a plot in San Jose de Grecia (experimental unit G), with the aim providing the water needed by the crop for flowering stage since water deficiencies at points can have a severe impact on yield.

To develop the designs, relevant analyses were carried out to determine the characteristics of the experimental units; the data provided by the results of the analyses was used to prepare agronomic and hydraulic designs capable of meeting the specific requirements of the experimental units.

To evaluate the economic viability of the proposals, the NPV, IRR and PBP were calculated for each design, with the results showing that both are economically viable; the economic analysis highlighted that the topography and water source are the variables that have most impact in the costs of the design proposed for experimental unit T while the source disposition had greater impact on the cost of experimental unit G. Finally environmental analyses showed that none of the proposals, if implemented would have a negative impact on the plot's environments.

Key words: Design, Irrigation, Drip, Coffee, Analysis.

2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Uno de los principales problemas que tienen los caficultores en la región denominada Valle Occidente, según indica Pedro Pereira, Pereira, (2021), miembro de FJ Orlich & Hnos. Ltda., es la disminución de la producción debido a la irregularidad de las precipitaciones, por esto, es de suma importancia contar con sistemas de riego que sirvan como seguro de cosecha en caso de que se den las primeras lluvias (las cuales inducen la floración de la planta) y que estas cesen antes de aportar la lámina necesaria para la apertura floral, debido a esto se puede perder parte importante de las flores, lo que se ve reflejado en una disminución de la productividad.

Contar con un sistema de riego que permitan reponer la deficiencia hídrica en la etapa de floración puede reducir significativamente las pérdidas de cosecha al final de la temporada. Además, es importante agregar que este sistema podría ser útil para las siguientes fases del cultivo con el fin de que la cosecha se desarrolle de la mejor manera, contribuyendo con el llenado del grano, buscando lograr una mayor productividad.

Según la clasificación de Vignola et al., (2018), la mayor afectación que recibe la Región cafetalera Valle Occidental es, muy alta afectación por la sequía y el fenómeno de El Niño, alta afectación por lluvias irregulares. También se identifica que la floración recibe alta afectación por lluvia al igual que el proceso de maduración de la fruta.

En un estudio realizado por el Instituto del Café de Costa Rica, Icafe et al., (2016), la Región Valle Occidental los promedios anuales de precipitaciones rondaban los 2000 mm a 2200 mm, pero en los últimos años se ha disminuido a menos de 1800 mm, sin embargo, el principal problema es la distribución de las lluvias a lo largo del año.

El café tiene 7 fases fenológicas, una de ellas es la fase de floración, la cual según Vignola et al., (2018), es de gran importancia, ya que presenta una relación directa con la cantidad y la calidad de los frutos a cosechar.

Lo comentado por Pereira, (2021), es reforzado por Ramírez B et al., (2010) quien dice que para que se dé la floración del café debe haber una variación agroclimática, entre las que resalta la disponibilidad hídrica en el suelo. Este factor en específico es controlable con la implementación de sistemas de riego.

Resaltando la importancia del riego en el café, el Ministerio Nacional de Ambiente y Energía, MINAE et al., (s/f), señala que, cuando las yemas han madurado, es necesaria abundante lluvia que permita que las raíces absorban agua y activen las yemas florales para su apertura, este proceso es sumamente delicado y se ve principalmente afectado por el volumen de las precipitaciones, en caso de que estas sean escasas muchas de las yemas puede que no se abran o lo hagan parcialmente disminuyendo la potencial cosecha. Por otro lado, si las lluvias son tardías, muchas de las yemas pueden haber perdido su viabilidad de forma que, incluso con una abundante floración, puede que se tenga una cosecha escasa, por lo tanto, con el riego es posible aplicar la lámina necesaria en el momento oportuno para lograr una optimización de la floración. Para alcanzar la floración, en MINAE et al., (s/f) se indica que el cultivo debe pasar por un periodo de estrés hídrico, después del cual se deben tener fuertes precipitaciones que induzcan la floración. Además, Pereira, (2021) indica que si el cultivo no ha pasado el periodo de estrés hídrico y llueve o se realiza el riego, no se dará la floración. Como otro aspecto positivo se tiene la posibilidad de ajustar las fechas de floración de las diferentes parcelas bajo riego y con ello hacer un uso más eficiente de la mano de obra para la recolección de las cosechas, esto se puede realizar siempre y cuando el cultivo haya pasado por el periodo de estrés hídrico necesario.

Como se puede observar, la relación entre la floración y la cosecha es directa, al igual la relación que mantiene la floración con el agua disponible en el momento oportuno, por lo tanto, el diseño de un sistema de riego puede representar para las fincas seleccionadas un seguro en sus cosechas en caso de que se pongan en práctica, además sirve como ejemplo para más productores para que puedan observar en campo los beneficios que podría aportar el riego a sus cultivos.

FJ Orlich & Hnos. Ltda., cuenta en la región Valle Occidente con más de 1500 productores asociados, dicha región abarca San Ramón, Palmares, Grecia y Naranjo. En toda su extensión se tiene una gran variabilidad en las condiciones de las fincas, por esto se esperan variables significativas en los diseños necesarios. Por lo que, fueron seleccionadas dos unidades experimentales que cuenten con diferencias significativas en sus condiciones, a las cuales se les

diseñó un sistema de riego. Finalmente se van a presentar los resultados obtenidos para cada uno de los diseños.

El café es uno de los principales cultivos en el país, realizar más estudios que aporten información sobre dicho cultivo es de gran importancia a nivel nacional y sin lugar a duda para los miles de personas involucradas en la producción de café. Según Icafe, (2019), en la actualización de datos realizada entre el 2017 y el 2018, en el país se tienen más de 93 500 ha cultivadas de café, de las cuales alrededor del 23 % se encuentran en el Valle Occidental.

Para lograr de manera exitosa el proyecto se plantean los siguientes objetivos.

Objetivo general

1. Diseñar dos sistemas de riego a partir del análisis de topografía, fuente de agua, suelo y clima para el abastecimiento de las necesidades hídricas en la etapa de floración de *Coffea arabica* en unidades experimentales asociadas a FJ Orlich & Hnos Ltda en Naranjo y Grecia, Alajuela.

Objetivos específicos

1. Evaluar las condiciones topográficas, hídricas, edáficas, y climáticas que presenta cada una de las unidades experimentales para el posterior diseño de los sistemas de riego.
2. Definir el diseño agronómico e hidráulico del sistema de riego según las características de cada unidad experimental, para que cubra las necesidades de estas.
3. Analizar la viabilidad económica de cada uno de los diseños del sistema de riego, así como los parámetros más influyentes en el costo de los diseños y el impacto ambiental en su instalación.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

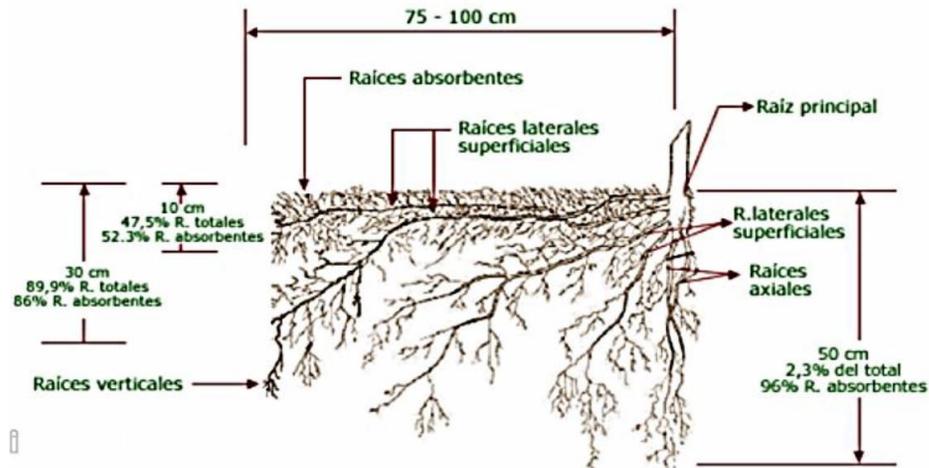
3.1 Café

Este cultivo pertenece al género *coffea* el cual cuenta con aproximadamente 100 especies, de estas destacan 3 que son cultivadas comercialmente: *Coffea arabica*, *Coffea Canephora* y *Coffea liberica*. De dichas especies, la *Coffea arabica* es la más explotada a nivel mundial. (Mora, 2008). De estas 3 especies, en Costa Rica, entre los años 1998 y 2018, solo estuvo permitido el cultivo de *Coffea arabica*, ya que, según Vignola et al., (2018), el país tiene gran interés en mantener altos estándares de calidad en su producción, por esto, se prohibió la utilización de otras especies. Sin embargo, en febrero del año 2018, el decreto que prohibía la siembra de especies diferentes a la *Coffea arabica*, fue derogado por el decreto Autoriza la siembra, cultivo, beneficiado y comercialización de Café “*Coffea Canephora*” en Costa Rica, (2018), por lo tanto, desde febrero de 2018, en Costa Rica es permitida la siembra de *Coffea arabica* y *Coffea Canephora*.

La planta de café cuenta con un sistema radicular que se forma desde la germinación de la semilla, iniciando con el desarrollo de una raíz principal, de la cual se desarrolló todo el sistema radicular. La raíz pivotante de la planta de café puede alcanzar hasta los 60 cm de profundidad, además cuenta con raíces axiales que le ayudan a la planta a mejorar su anclaje y también un sistema de raíces laterales, de las cuales se forman las raicillas, raíces encargadas de la absorción de nutrientes. La planta de café cuenta con un sistema radicular relativamente superficial, teniendo el 52% de las raíces absorbentes en los primeros 10 cm de profundidad, el 80% de las raíces absorbentes a los 30 cm de profundidad y el 96% de las raíces absorbentes a los 50 cm de profundidad. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2019).

En la Figura 3-1 se muestra el sistema radicular de las plantas de café.

SISTEMA RADICULAR DEL CAFETO



Fuente: (Barquero Miranda, 2016).

Figura 3-1 Sistema radicular de la planta de café

Según el Centro de Investigación del café CICAPE, (2020), las condiciones ideales para el café son:

3.1.1 Altitud

Tiene incidencia directa sobre la temperatura y la precipitación. La altitud óptima para el desarrollo del cultivo va de los 500 a los 1800 msnm.

3.1.2 Precipitación

Es de gran relevancia la cantidad y la distribución de las lluvias a lo largo del año, para el correcto desarrollo del café, ya que, con menos de 1000 mm anuales, el crecimiento de la planta se ve perjudicado al igual que la cosecha del año siguiente. Un periodo de sequía muy prolongado podría causar la muerte de la planta. Por otro lado, si se tienen precipitaciones mayores de 3000 mm anuales, la calidad física del grano se puede ver afectado.

3.1.3 Temperatura

Para el café, las condiciones de temperatura promedio anuales que le favorecen están entre los 17 °C y los 23 °C.

3.1.4 Humedad relativa

Promedios mensuales de humedad superior al 85 %, favorecen las enfermedades fungosas.

3.1.5 Viento

Fuertes vientos favorecen el daño mecánico de las plantas, por lo que, es importante que los terrenos en que se cultiva café estén protegidos del viento o poder contar con barreras rompevientos para evitar los daños que pueden sufrir las plantas.

3.1.6 Distancia de siembra

Para el cultivo de café se recomienda una densidad de siembra de 5000 a 5500 plantas por hectárea, sin embargo, los arreglos de siembra se pueden definir de acuerdo con la lluvia en la zona, la distribución recomendada según las precipitaciones se muestra en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Distancia de siembra recomendada para el café según precipitaciones

Régimen de lluvia	Distancia entre hileras (m)	Distancia entre plantas (m)
Época seca muy marcada	2,00	1,00
	2,20	0,90
	2,40	0,80
Época seca poco marcada	2,00	1,00
	2,25	0,85
	2,50	0,80

Fuente: adaptado de (CICAPE, 2020).

3.1.7 Pendiente

Al ser el café una planta robusta se adapta a todos los tipos de topografía, además, las zonas planas permiten mayor mecanización del cultivo, sin embargo, como todas las actividades

necesarias para la producción del café se pueden realizar de manera manual, las zonas con pendientes pronunciadas son aprovechables con el cultivo de café. (Mora, 2008).

3.1.8 Riego

Según Ruiz Canales & Molina Martínez, (2010), a nivel mundial, el 40 % de la producción de alimentos se realiza bajo sistemas de riego, además, al ser la agricultura la actividad que más agua demanda a nivel mundial y la encargada de satisfacer las necesidades alimenticias de la creciente población, se deben mejorar las tecnologías utilizadas para el riego con el fin de hacer frente a la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico.

Villalobos Araya, (2008) indica que el riego es la reposición del agua consumida por evapotranspiración en un perfil de suelo, también resalta que este debe ser un proceso oportuno y uniforme.

Para el café, la instalación de un sistema de riego desde que se siembre puede brindar seguridad al productor durante la etapa de floración y cuaje de los frutos. Cuando se piensa en el sistema de riego a establecer, es de suma importancia tener conocimiento de la fuente de agua con que se cuenta. Sin embargo, siempre es importante considerar el sistema que aproveche mejor el recurso hídrico, hoy en día serían los sistemas de riego por goteo. (CICAFE, 2020).

3.1.9 Afectación por cambio climático.

Según Descamps, (2017), algunas de las consecuencias que tiene el cambio climático en la producción de café son:

Disminución en la velocidad de crecimiento de las plantas, debido al aumento de la temperatura.

- La calidad del café se afecta de manera negativa.
- Aumento en las plagas y enfermedades, especialmente la roya.
- Aborto de flores.

- La irregularidad en las lluvias afecta la floración del café.
- Si no llueve después de que el abono es aplicado, se pierde gran parte de este.
- Las lluvias en época de cosecha pueden hacer que se pierda el café.

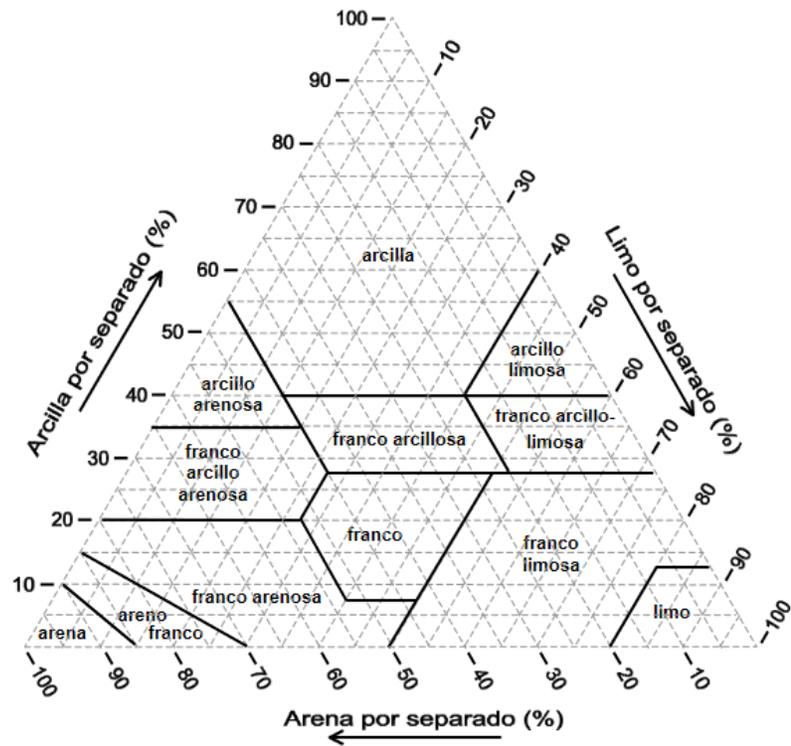
3.2 Suelo

El suelo es una de las bases en que se desarrolla la agricultura y toma gran importancia cuando se trabaja en el diseño de sistemas de riego, ya que, va a ser el lugar en que se deposita el agua para que sea tomada por las plantas. Para Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, 2015), el suelo es la capa más superficial de la Tierra y es el medio en que se desarrollan las plantas, porque, es capaz de aportar los nutrientes necesarios para el desarrollo y además retiene agua y la va cediendo a medida que las plantas la necesitan. El mismo autor indica que el suelo está formado por partículas sólidas entre las cuales quedan espacios porosos que son ocupados por; aire y pequeños animales que viven en el suelo, los poros de mayor tamaño y agua que se almacenan en los poros de menor tamaño y que las plantas aprovechan.

3.2.1 Textura

FAO, (s/f) define la textura del suelo como el contenido relativo de partículas de diferentes tamaños (arena, limo y arcilla), e indica que la textura tiene relación con la cantidad de agua y aire que retiene el suelo y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa.

El tamaño de partículas se clasifican según Ciancaglini, (2017) como: mayores a 2 mm gravillas y gravas, entre los 2 mm y 0,2 mm se encuentran las arenas gruesas, de los 0,2 mm a 0,02 mm la arena fina, de 0,02 mm a 0,002 mm limos y menores a 0,002 mm arcillas. Según sea la distribución de dichas partículas en el suelo, este se clasifica de diferentes maneras, por lo que, conociendo dicha distribución de partículas, se puede hacer uso del triángulo de texturas para determinar el tipo de suelo. En la Figura 3-2 se muestra un triángulo de texturas.



Fuente: (USDA, 1999)

Figura 3-2 Triángulo de texturas según distribución de partículas

3.2.2 Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)

Se dice que el suelo está a capacidad de campo, cuando el agua que se encuentra en este está retenida a 1/3 de bar de succión, FAO, (s/f) indica que este estado es alcanzado cuando el suelo ha sido saturado y se deja drenar libremente evitando la evapotranspiración hasta que el potencial hídrico se estabilice. Por otro lado, define PMP como el punto en que el agua se encuentra retenida a 15 bares de succión, en este momento las plantas no tienen la capacidad de extraer agua y continúan perdiendo agua por evapotranspiración, por lo que la planta pierde turgencia y se marchita.

3.3 Condiciones agroclimáticas

3.3.1 Evapotranspiración (Et)

La ET está dividida en dos componentes principales, la evaporación y la transpiración, la primera hace referencia al proceso en el que el agua pasa de líquido a gas y se escapa de la superficie evaporante, la cual puede ser, lagos, río, caminos, suelos y la vegetación mojada. La transpiración es la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta que posteriormente pasa a la atmosfera, principalmente al salir por estomas. Ambos procesos ocurren de manera simultánea y no hay manera sencilla de distinguirlos, formando lo que se conoce como evapotranspiración. (Allen et al., 2006).

3.3.2 Evapotranspiración potencial (Eto)

Allen et al., (2006) definen la Eto como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que se da sin restricciones de agua. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto con características específicas.

3.3.3 Evapotranspiración de cultivo (Etc)

Al ser la Eto la evaporación que se tiene en un cultivo de referencia, se debe de realizar la un ajuste para obtener el valor de la Et del cultivo para el que se desea diseñar, para esto, se debe multiplicar la Eto por Kc y se obtiene la evapotranspiración del cultivo (Etc). (Allen et al., 2006)

3.3.4 Coeficiente de cultivo (Kc)

El coeficiente de cultivo expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia. (Allen et al., 2006).

Dependiendo de la etapa en que se encuentre un cultivo se tienen variaciones en su Kc, en el Cuadro 3.2 se muestra el Kc para el café.

Cuadro 3.2 Coeficiente de cultivo Kc para el cultivo de café, por etapas

No	Fases	Kc = ETc/ETo
I	Floración - Fructificación	1,04
II	Fructificación – desarrollo del fruto	0,49
III	Maduración – Cosecha	1,01
IV	Cosecha – Recuperación	0,92
	Global	0,96

Fuente: adaptado de (Cisneros Zayas et al., 2016)

3.4 Riego por goteo

El riego por goteo es un método de riego a presión, los cuales, según Villalobos Araya, (2008), son aquellos sistemas que requieren la aplicación de energía para su funcionamiento, la cual puede ser suministrada por diferencia de altura o haciendo uso de equipos de bombeo. El mismo autor indica que el riego por goteo es la aplicación del agua solamente en los lugares que es realmente necesaria. También indica que este es un sistema adaptable a todo tipo de suelo y pendiente.

Este método se basa en la aplicación de agua en forma de gotas de manera continua en un lugar próximo a la planta, mojando únicamente una parte del suelo. Al igual que en todos los sistemas presurizados, es necesario realizar un diseño agronómico e hidráulico previo a la instalación.

3.5 Red de conducción

Torres Hernández, (2013) indica que la conducción es el conjunto de tuberías que conducen el agua a las diferentes zonas de interés, dichas tuberías pueden ser en PVC o PE.

Dentro de un sistema se llaman líneas de conducción al conjunto de tuberías y dispositivos de control que permiten el transporte del agua desde la fuente hasta el sitio en que inicia la distribución. (Martínez Menes et al., s/f).

Las conducciones se pueden diseñar aprovechando las diferencias de altura existentes, conducción por gravedad, en este caso, la altura piezométrica requerida es menor a la altura de

la fuente de abastecimiento, también se puede hacer uso de sistemas de bombeo, en este caso, la altura piezométrica requerida es mayor a la altura disponible, por lo tanto es necesario adicionar energía para solventar el gasto que se tiene y finalmente se puede realizar una combinación de estas, bombeo – gravedad, esto cuando la topografía de la zona obliga a realizar el trazo de la conducción por partes en donde se supera la altura de la fuente, se requiere bombeo, pero a la vez se tiene que esta zona cuenta con una altura mayor que la altura piezométrica requerida en el punto de entrega, se puede realizar por gravedad. Es estos casos se tiene un tanque que hace la división entre la zona de bombeo y la de gravedad. (CONAGUA, 2007).

3.5.1 Tuberías

Se encargan de hacer llegar el fluido de un punto a otro y distribuirlo por todos los lugares de interés. Pueden ser de distintos materiales, entre estos el PE, el PVC y el acero. (Martínez Barrera, 2000).

Para la selección de las tuberías se debe pasar por un proceso cálculo de las dimensiones de estas, ya que, logrando el correcto dimensionamiento, se asegura el adecuado flujo de agua y se evita que se generen pérdidas de presión excesivas que afecten el correcto funcionamiento del sistema. (Gualancañay Miñarcaja & Jaguaco Quiña, 2018).

3.5.2 Accesorios

Los accesorios cumplen diferentes funciones en los tubosistemas, entre los cuales resaltan; unir tramos de tuberías, cambiar la división de la línea, cambiar diámetro de las líneas, conectar diferentes ramas de las líneas. (González, 2014).

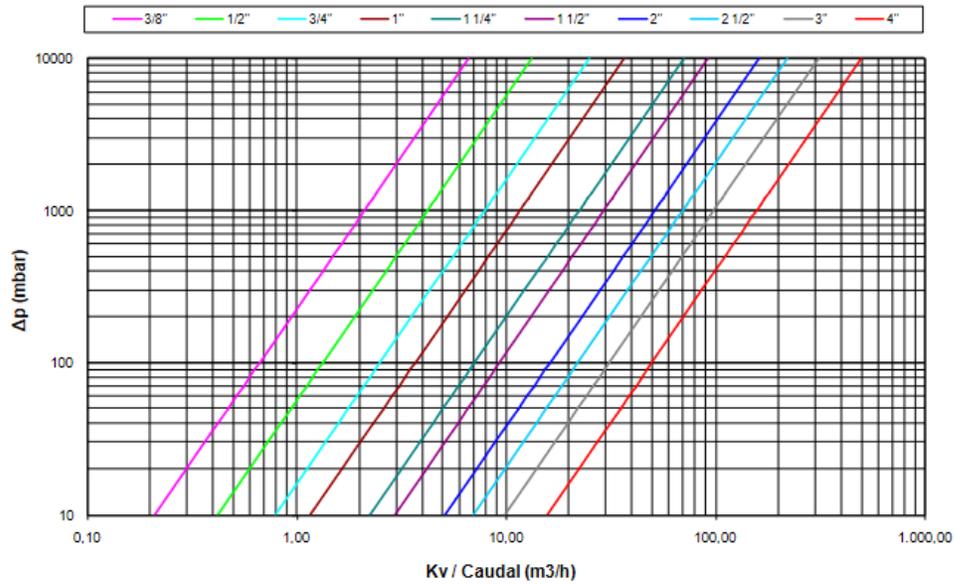
Entre los principales accesorios se tienen; tes, cruces, codos con salida lateral los cuales forman parte de los accesorios de derivación, las curvas y los codos se pueden agrupar como accesorios que cambian la dirección del flujo. (Calderón Córdova & Pozo Calva, 2011).

3.6 Válvulas

Las válvulas son una parte de gran importancia en los tubosistemas, estas cumplen diferentes funciones y logran adaptar los sistemas a las diferentes necesidades que se tengan. Principalmente se cuenta con válvulas de cierre y de regulación. Las pertenecientes al primer grupo pueden utilizarse para determinar que parte de la instalación va a estar en servicio y que parte no, también se utilizan cuando se requiere aislar elementos. Las que pertenecen al grupo de las válvulas de regulación son útiles para definir el punto de operación del sistema. Junto con estas dos grandes funciones se tiene diferentes válvulas que permiten, entre otras cosas, evitar el retorno del fluido, regular o limitar las presiones de operación, expulsar o permitir el ingreso de aire, entre otras. (Blanco Marigorta et al., 1994).

Al ser las válvulas elementos que unen a la línea principal, estas generan singularidades en la línea, las cuales generan pérdidas de carga en el sistema, dichas pérdidas deben ser consideradas, ya que, en el caso que no se consideren, puede que el sistema no trabaje como se espera. Para esto, actualmente la mayoría de los fabricantes facilitan las gráficas en las que se pueden obtener las pérdidas de los elementos según el caudal que transita por ellos. (Pirobloc, 2019).

En la Figura 3-3 se muestra un ejemplo de diagrama de pérdidas.



Fuente: (Genebre, 2020).

Figura 3-3 Diagrama de pérdidas de presión

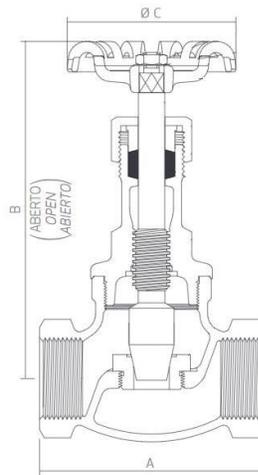
Como se puede observar en la Figura 3-3, las pérdidas generadas en las válvulas crecen conforme crece el caudal que transcurre por ellas, además, las pérdidas generadas van a ser dependientes del diámetro del accesorio, permitiendo, con un mismo caudal tener menores pérdidas cuanto mayor sea el diámetro del accesorio.

3.6.1 Tipos de válvulas

Entre las válvulas que se utilizan más comúnmente se tienen:

- a. Válvulas de aguja: es un elemento que cuentan con un vástago roscado de extremo cónico, es una válvula de cierre lento, es decir, se necesitan varios giros para que se pase de estar completamente abierta a completamente cerrada. Gracias a su diseño, es adecuada para la regulación de flujo, con pérdidas de carga mínimas y sin cavitación. Además, al ser una válvula de cierre lento reduce el golpe de ariete generado en los sistemas al cerrar la válvula. (Twyman, 2018).

En la Figura 3-4 se muestra el diagrama de una válvula de aguja.

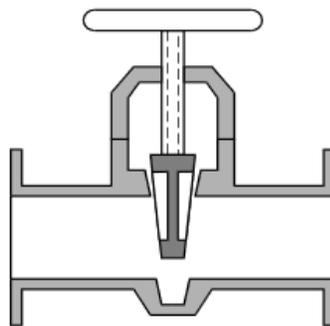


Fuente: (Deca, s/f)

Figura 3-4 Válvula de aguja

- b. Válvula de compuerta: está formada por una compuerta circular o rectangular que se desliza en un plano perpendicular a la tubería realizando el seccionamiento de esta y, por lo tanto, deteniendo el flujo. Cuando se encuentra abierta deja el conducto prácticamente libre, por lo que las pérdidas generadas son apenas perceptibles. Es una válvula que se utilizan completamente abierta o cerrada, no es recomendado utilizarla para la regulación del flujo. (Blanco Marigorta et al., 1994).

En la Figura 3-5 se muestra un diagrama de las válvulas de compuerta.



Fuente: (Blanco Marigorta et al., 1994)

Figura 3-5 Válvula de compuerta

- c. Válvula de mariposa: al igual que las válvulas anteriores, esta válvula es utilizada para el seccionamiento de las conducciones de fluidos a presión, el trabajo lo realiza mediante un obturador de disco o lenteja que gira reduciendo el área disponible, hasta lograr el cierre total de la sección. (CEDEX, s/f).

En la Figura 3-6 se muestran una válvula de mariposa.

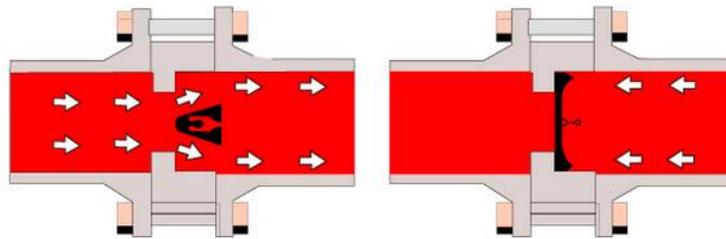


Fuente: (Bray, 2020)

Figura 3-6 Válvula de mariposa

- d. Válvula antirretorno o de retención: este tipo de válvula es conocida comúnmente como “válvula check”, es un elemento unidireccional y se encarga de que el solo haya fluido en una dirección. Comúnmente se utiliza en estaciones de bombeo para evitar que el fluido que queda en la línea retorne cuando las operaciones de bombeo se han detenido. (Válvulas Internacionales, 2018).

En la Figura 3-7 se muestra un diagrama de válvulas antirretorno

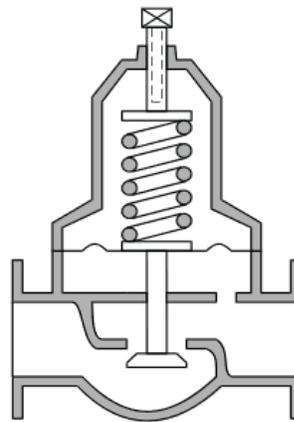


Fuente: (Válvulas Internacionales, 2018)

Figura 3-7 Válvula antirretorno

- e. Válvula reductora de presión: como su nombre lo indica, esta válvula reduce la presión del fluido que transcurre por ella, hasta llegar a la presión de salida deseada. Como indica Blanco Marigorta et al., (1994), dicha válvula tiene la capacidad de mantener la presión por debajo de ella constante, siempre y cuando la presión aguas arriba sea mayor a la presión que se desea tener aguas abajo.

La Figura 3-8 se muestra un diagrama de una válvula reguladora de presión.



Fuente: (Blanco Marigorta et al., 1994)

Figura 3-8 Válvula reguladora de presión

- f. Válvula de admisión/expulsión de aire: es un elemento esencial en los sistemas que funcionan a presión, ya que, la presencia de aire en dichos sistemas puede causar

problemas de funcionamiento e incluso daños en este. Según CEDEX, (s/f) es un elemento que se conecta a la tubería en los puntos altos relativos y puede realizar las siguientes funciones:

Expulsar el aire que se encuentra almacenado en la tubería mientras esta se llena.

Expulsión continua del aire procedente de la desgasificación del agua.

Entrada de aire la tubería cuando esta se está vaciando, esto con el fin de evitar el vacío dentro de esta, lo que puede provocar una implosión.

En la Figura 3-9 se muestra una válvula de aire trifuncional.

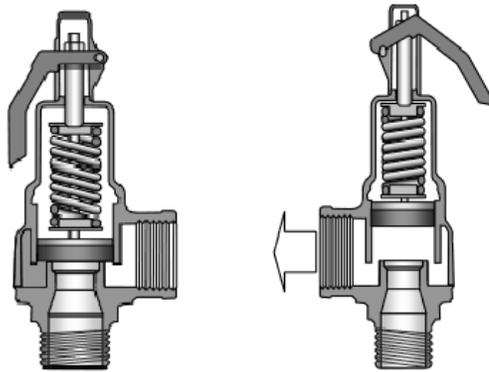


Fuente: (A.R.I, 2014)

Figura 3-9 Válvula de aire trifuncional

- g. Válvula de alivio: La Oficina de Agua Potable, (2011) indica que la válvula de alivio de presión protegen a los equipos de fallos catastróficos en los casos que la presión del sistema exceda los límites seguros. Cuando se excede la presión establecida, la válvula permite el escape de aire o agua para aliviar este exceso de presión.

En la Figura 3-10 se muestra el diagrama de una válvula de alivio de presión cuando se encuentra cerrado (izquierda) y cuando esta se encuentra abierta (derecha).

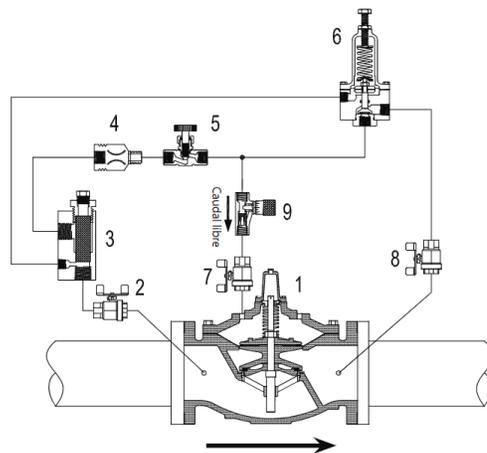


Fuente: (La Oficina de Agua Potable, 2011).

Figura 3-10 Válvula de alivio de presión

- h. Válvula sostenedora de presión: es una válvula que mantienen la presión deseada aguas arriba de donde se encuentra ubicada, cuando la presión aguas arriba cae por debajo del límite establecido, la válvula se va a accionar hasta lograr la presión establecida. En caso de que la presión sea superior a la establecida la válvula actúa tratando de reducir la presión hasta alcanzar el punto predefinido. (Villafañe Avila & Padilla Arenas, 2004).

En la Figura 3-11 se muestra un diagrama de válvula sostenedora de presión.

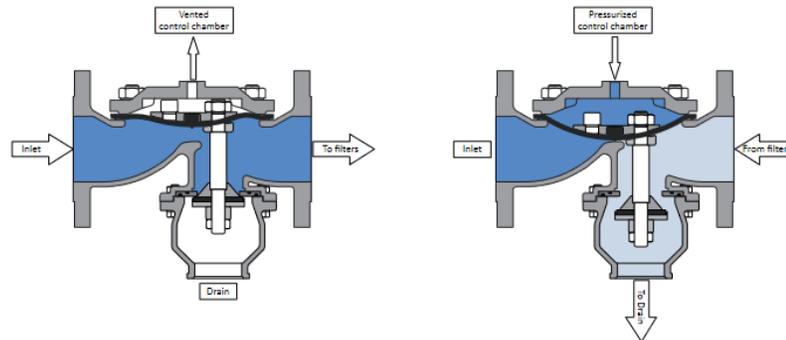


Fuente: (Singer Valve, 2011).

Figura 3-11 Válvula sostenedora de presión

- i. Válvula de retrolavado: es una válvula de tres vías, es operada por la presión en la línea o presión neumática externa. Cambia la dirección del flujo para poder realizar las operaciones de lavado de filtros de los sistemas. (ARMAS, s/f).

En la Figura 3-12 se observa una válvula de retrolavado en función de filtrado (izquierda) y en función de retrolavado (derecha).



Fuente: (Dorot, 2019)

Figura 3-12 Válvula de retrolavado

3.7 Filtrado

Los sistemas de filtrado son esenciales, para el correcto funcionamiento de sistemas de riego, en especial si estos son sistemas de riego por goteo, ya que, los problemas más frecuentes que suelen presentarse en dichos sistemas, es la obstrucción de los goteros, ya sea por partículas minerales suspendidas, materia orgánica y precipitados. Para evitar la entrada de estos agentes no deseados al sistema, se deben tomar precauciones desde la toma de agua. (Liotta et al., 2015).

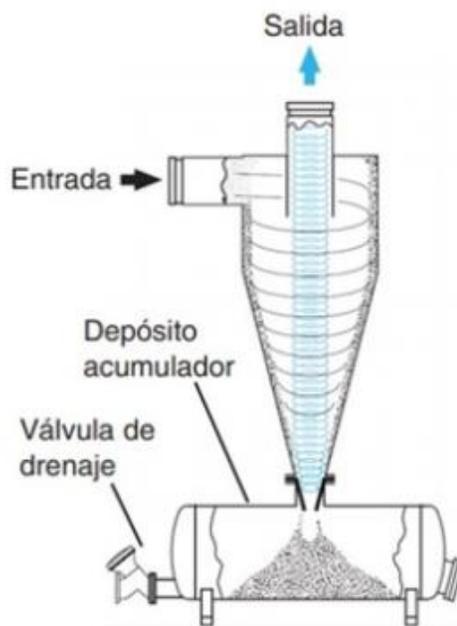
3.7.1 Tipos de filtros

Liotta et al., (2015), clasifican los tipos de filtros como:

- a. Rejillas o decantadores: la rejilla es utilizada en la toma del agua para evitar el ingreso de objetos grandes como ramas y hojas. Un decantador es utilizado para separar las partículas más grandes, principalmente arenas.

- b. Prefiltrado en la succión: en el inicio de la succión, justo donde se encuentra la válvula de retención, se debe proteger del ingreso de partículas que puedan dañar el sistema de impulsión.
- c. Hidrociclones: es utilizado cuando el agua que se utiliza proviene de perforaciones, es útil para separar gravillas y arenas, el agua ingresa de manera tangencial al filtro formando un vórtice, las arenas decantan y se depositan en un recipiente inferior. Se dice que pueden tener una eficiencia de hasta el 98% en partículas superiores a 100 micrones.

En la Figura 3-13 se muestra un filtro hidrociclón.



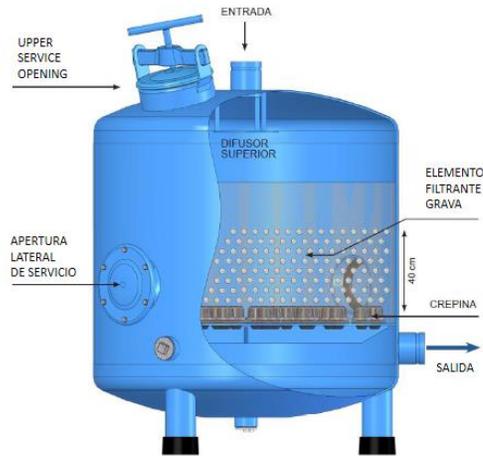
Fuente: (Monge Redondo, 2018).

Figura 3-13 Filtro hidrociclón

- d. Filtro de grava: también conocido como filtro de arena, es un tanque, metálico o plástico, en el cual se contienen arenas o gravas tamizadas, el agua pasa por el lecho filtrante y de camino van quedando las sustancias orgánicas y partícula. Se

recomienda proceder con el lavado del filtro cuando la diferencia de presión entre la entrada y la salida es superior al 30%.

En la Figura 3-14 se muestra un filtro de grava. Para el proceso de filtrado se invierte la dirección del flujo.



Fuente: (Yamit Filtration, 2021)

Figura 3-14 Filtro de grava

- e. Filtro de malla: el filtro de malla está compuesto por una carcasa que aloja un cartucho con una malla que puede ser de diferentes diámetros según el filtro. Este tipo de filtro se clasifica según sea el “mesh”, el cual es un número que representa la cantidad de agujeros por cada pulgada lineal, por lo tanto, cuanto mayor sea el número, menor es el tamaño de los agujeros.

La Figura 3-15 muestra un diagrama de un filtro de malla.

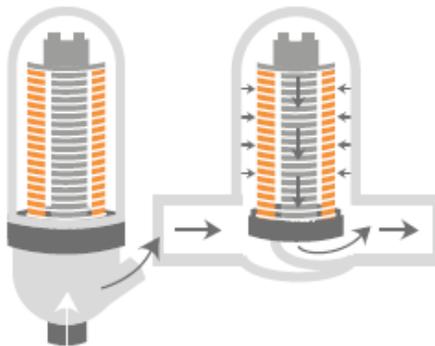


Fuente: (AZUD, s/f)

Figura 3-15 Filtro de malla

- f. Filtro de anillas: es un filtro similar al filtro de malla, solo que el cartucho está compuesto por discos con ranuras en ambas caras, los cuales, superpuestos forman conductos de paso para el agua. Tanto el filtro de malla como el de anillas son útiles cuando se desea filtra, arenas, limos, arcillas y sustancias orgánicas. Al igual que en el filtro de grava, pueden realizarse retrolavado cuando sea necesario, recomendado cuando la pérdida de carga es superior a los 5 m y también se puede hacer la limpieza de forma manual.

La Figura 3-16 muestra un diagrama de un filtro de anillas.



Fuente: (Liotta et al., 2015)

Figura 3-16 Filtros de anillas

La selección del conjunto de filtrado va a depender tanto de las necesidades del sistema como de las características de la fuente.

En el Cuadro 3.3 se resumen los sistemas de filtrado recomendados según lo que se quiera separar.

Cuadro 3.3 Tipo de filtro según el material que se desee separar

Tipo de elemento	Hidrociclón	Grava	Malla y anillas
Arena	Sí	No	Sí
Limos y arcillas	No	Sí	Sí
Sustancias orgánicas	No	Sí	Sí

Fuente: adaptado de (Liotta et al., 2015)

3.8 Bombeo

La utilización de un sistema de bombeo es necesaria cuando hay que adicionar energía para llevar el agua de un punto a otro, es decir, cuando la elevación de la fuente es menor a la altura piezométrica requerida en el punto de entrega, el equipo de bombeo debe de solventar estas diferencias de altura. (CONAGUA, 2007).

Un equipo de bombeo está formado principalmente por dos partes, la bomba que es la que imprime la energía al fluido y su accionador, el cual puede ser un motor eléctrico, de combustión interna, entre otros, que se encarga de transferir la energía a la bomba. (GeoHidráulica, 2021).

Las bombas que se utilizan con mayor frecuencia son las bombas centrifugas, horizontales y verticales y las bombas sumergibles, el tipo de bomba que se seleccione va a ser la que mejor se adapte a las necesidades del proyecto. (OPS, 2005).

El mismo autor clasifica las bombas de la siguiente manera:

- a. Bomba centrífuga horizontal: el eje de transmisión de la bomba se ubica de manera horizontal. Este tipo de bomba tiene la ventaja de que se pueden instalar en un lugar distinto de la fuente de abastecimiento, lo que hace que se puedan instalar en lugares secos, protegidos, ventilados y de fácil mantenimiento.

- b. Bomba centrífuga vertical: este tipo de bomba cuenta con el eje de transmisión de forma vertical, sobre el cual se apoyan un determinado número de impulsores que elevan el agua por etapas. Debe ubicarse directamente sobre el punto de captación lo que limita su uso a pozos profundos. La principal ventaja de este equipo es la versatilidad que presentan de trabajar en un amplio rango de velocidades.
- c. Bomba sumergible: este equipo tiene la bomba y el motor acoplados en forma compacta, por lo que ambos funcionan sumergidos en el punto de captación, es empleada casi de manera exclusiva en pozos profundos. Una de las principales desventajas es que, al estar el motor y la bomba acoplados y sumergidos en el punto de captación, no existe manera de llegar a ellos sin detener las labores de bombeo por periodos más prolongados que con los dos sistemas de bombeo mencionados anteriormente.

3.9 Mecánica de fluidos

Para Mott, (2006), la mecánica de fluidos es el estudio del comportamiento de los fluidos, ya sean estos líquidos o gaseosos, se encuentren en reposo o en movimiento .

Se dice que la mecánica de fluidos es la ciencia que estudia la cinemática y la dinámica de los fluidos cuando se le aplican diferentes fuerzas. (Pasinato, 2008).

3.9.1 Pérdidas de carga

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. (Mott, 2006).

El mismo autor nos habla de las que se conocen como pérdidas secundarias, las cuales son generadas por los accesorios que se agregan a la red, estas pérdidas se generan debido a que se generan turbulencias locales, lo que ocasiona que la energía se transforme a energía térmica.

3.9.2 Golpe de ariete

El golpe de ariete es generado por ondas en el interior de un sistema a presión cuando hay un cambio en la velocidad del flujo, por esto la velocidad de cierre de las válvulas juega un papel importante en la prevención del golpe de ariete, ya que, cuanto más alta sea la velocidad de cierre de una válvula, mayores serán las sobrepresiones que se generen, las cuales pueden generar daños en los sistemas.(Guevara Rodríguez et al., 2021).

3.10 Hidrometría

Al ser el agua un elemento fundamental para la vida es de vital importancia su aforo, ya que, contar con el conocimiento del agua disponible nos permite hacer uso de esta sin afectar a los demás organismos que dependen de la misma.

La hidrometría se encarga de medir el caudal de agua con el que se cuenta en un lugar determinado, a la vez, se encarga de analizar la disponibilidad y distribución eficiente del recurso hídrico. (Flores Saira, 2018).

3.10.1 Aforos

Aforar una corriente es, determinar a través de mediciones, el caudal que transcurre por un espacio dado en un momento dado. (Villón, 2004).

Para realizar aforos existen diferentes métodos, de los cuales, en este trabajo se tratarán solo dos.

- a. Aforo volumétrico: este es un método en el que se hace llegar la corriente a un depósito de volumen conocido y se mide el tiempo que dura dicho depósito en llenarse, conociendo el volumen y el tiempo se puede conocer el caudal que se tiene.

- b. Aforo con correntómetro: en este método, a diferencia del anterior se debe de contar con equipo especializado, específicamente un correntómetro o molinete. Este dispositivo mide la velocidad de la corriente en un punto dado. Cabe destacar que la medición de la velocidad se realiza de manera indirecta, ya que, el correntómetro cuenta las revoluciones que se tienen en un tiempo específico y por medio de una fórmula propia del instrumento se calcula la velocidad. Una vez obtenida la velocidad se debe obtener el área de la sección en donde se obtuvieron las velocidades y con el método de área y velocidad promedio se obtiene el caudal buscado.

En la Figura 3-17 se muestra un ejemplo de hidrómetro, en este caso de eje horizontal.



Fuente: (Villón, 2004)

Figura 3-17 Hidrómetro de eje horizontal

3.11 Análisis ambiental

El análisis ambiental es una evaluación que se realiza antes de que se tomen decisiones irrevocables que vayan a generar impactos ambientales. Por lo tanto, el análisis ambiental identifica y analiza cada una de las afectaciones que va a generar un proyecto con el fin de tomar las medidas necesarias para la mitigación de los impactos. Este tipo de evaluación debe desarrollarse conjuntamente con el análisis económico, con el fin de tomar decisiones equilibradas. (Arias Zuñiga, 2006).

3.12 Análisis económico

Una vez realizado el estudio técnico y establecidas las necesidades del proyecto, se debe proceder con el estudio económico, el cual, según Baca Urbina, (2016), un análisis económico consiste en expresar en términos monetarios todas las decisiones tomadas durante el desarrollo técnico. Se debe realizar un análisis económico para conocer la inversión inicial y los costos. Además, en caso de que el análisis económico indique que el proyecto no es rentable se deben buscar alternativas que hagan que lo que se busca desarrollar sí sea económicamente viable.

Cuando se realiza la evaluación económica, se debe realizar el cálculo del flujo de efectivo para un tiempo proyectado y también definir la tasa mínima de rendimiento (TMAR), que se utilizará como punto de comparación cuando se realiza la evaluación económica. (Baca Urbina, 2016).

Como se sabe, el valor del dinero cambia con el tiempo, por lo tanto, se deben utilizar técnicas de evaluación económica basadas en el valor del dinero a través del tiempo, para poder decidir si el proyecto es o no rentable en el tiempo definido. Para esto Espinoza Gutiérrez et al., (2007), definió los siguientes parámetros.

- a. Valor actual neto (VAN): consiste en encontrar la diferencia entre el valor de los flujos de efectivo y de las inversiones, ambos actualizados. Se utiliza el rendimiento mínimo aceptable determinado por la empresa como tasa de descuento.
- b. Tasa interna de rendimiento (TIR): es el valor de la tasa de descuento que hace que el valor actual de los flujos de beneficios sea igual al valor actual de los flujos de inversión.
- c. Periodo de recuperación (PR): definido como el periodo de tiempo necesario para recupera la inversión inicial.

4 METODOLOGÍA

4.1 Evaluación de condiciones iniciales

Se realizó una visita guiada a cada una de las unidades experimentales, una ubicada en San José de Naranjo, denominada en adelante “unidad experimental T”, y la otra en San José de Grecia, denominada en adelante “unidad experimental G” con el fin de conocer las condiciones iniciales con que se cuenta en cada área y con esto tener conocimiento del equipo y los materiales necesarios para iniciar con las evaluaciones.

Una vez que fueron identificadas dichas características se procedió a realizar la solicitud del equipo necesario para el levantamiento topográfico y aforo de las fuentes.

4.2 Condiciones topográficas

4.2.1 Levantamiento topográfico

Se inició con el levantamiento topográfico utilizando una estación total, GeoMax Zipp10 Pro Series, propiedad de la Escuela de Ingeniería Agrícola, para esto se levantaron las zonas de interés en cada uno de las unidades experimentales, fuente de agua, límites de las área y topografía en general.

Evaluar las condiciones que presenta cada una de las unidades experimentales, tanto en el entorno como en los recursos disponibles, haciendo los estudios necesarios y las pruebas de campo que corresponda para la posterior identificación de las particularidades existentes en cada una de las unidades experimentales.

4.2.2 Procesamiento de datos

Con los datos obtenidos del levantamiento topográfico para cada una de las unidades experimentales, se procedió, con el software Civil 3D, a realizar la representación de las superficies generando las curvas de nivel necesarias para el posterior trasado de las líneas de conducción y distribución en el campo.

4.3 Fuentes de agua

Cada uno de los proyectos cuentan con diferencias en la fuente de abastecimiento. La unidad experimental T, cuenta con agua que llega a la finca por gravedad, mientras que para la unidad experimental G, se tiene un río como fuente de abastecimiento. Por lo tanto, se procedió con los aforos de la siguiente manera:

Unidad experimental T: con un recipiente de volumen conocido, “V”, y con un cronómetro para medir el tiempo “T”, se realizó un aforo volumétrico, una vez conocidos los volúmenes y tiempos respectivos, se procedió a aplicar la Ecuación 1. Además, se utilizó un manómetro para determinar la presión con que llega el agua a la finca, ya que, está ya ha sido captada y entubada hasta la finca.

$$Q = \frac{V}{T}$$

Ecuación 1

Q = Caudal (l/s)

V = Volumen (l)

T = Tiempo (s)

Unidad experimental G: en este caso se cuenta con un río como fuente de abastecimiento, por lo que, se procedió a realizar el aforo de esta con un correntómetro o molinete SEBA Miniflügel M1, el cual es propiedad de la Escuela de Ingeniería Agrícola. Con este se realizaron las mediciones de las diferentes secciones de la fuente, se realizó la medición correspondiente para el posterior seccionamiento de esta.

Posteriormente se procedió a calcular la velocidad media en cada una de las secciones realizadas, esto con la Ecuación 2 y la Ecuación 3 proporcionadas por el fabricante del equipo.

$$0,00 < n < 1.74 \quad v = 0,0123 + 0,2473 \cdot n$$

Ecuación 2

$$0,74 < n < 10 \quad v = -0,0042 + 0,2568 \cdot n$$

Ecuación 3

n = Relación de revoluciones entre tiempo (1/s)

v = Velocidad (m/s)

Como se puede observar dichas ecuaciones dependen del valor de n , que indica el número de revoluciones NR en un tiempo determinado T medido en segundos. La Ecuación 4 muestra el valor de n .

$$n = \frac{NR}{T}$$

Ecuación 4

n = Relación de revoluciones entre tiempo (1/s)

NR = Número de revoluciones (adimensional)

T = Tiempo (s)

Seguidamente se procedió a calcular el área de cada sección haciendo uso de la fórmula del trapecio que se muestra en la Ecuación 5.

$$A_i = \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot L_i$$

Ecuación 5

A_i = Área de la sección (m²)

h_i = Base mayor (m)

h_{i-1} = Base menor (m)

L_i = Altura (m)

Para posteriormente obtener el caudal que transcurre en cada una de las secciones con la Ecuación 6, dichos caudales fueron sumados para obtener el caudal de la fuente.

$$Q_i = v_{pi} \cdot A_i$$

Ecuación 6

Q_i = Caudal (m^3/s)

v_{pi} = Velocidad (m/s)

A_i = Área (m^2)

4.4 Análisis físico de suelos

4.4.1 Muestreo

Se inicio con la extracción de las muestras de suelo en cada una de las unidades experimentales, se realizó el muestreo de manera aleatoria a la profundidad en donde se encuentran la mayor parte de las raíces absorbentes del café. Se tomaron muestras para determinar la retención de humedad (CC y PMP), la densidad aparente (Dap), la humedad gravimétrica (Hg) y la distribución de partículas (fracción de arenas, limos y arcillas). En cada unidad experimental se tomaron: 1 muestra para retención de humedad, 1 muestra para Dap, una muestra para Hg y 5 muestras para distribución de partículas.

4.4.2 Análisis de muestras

El análisis de muestras fue realizado por terceros, específicamente en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la UCR (CIA).

4.5 Condiciones climáticas

Finalmente se procedió a calcular la Eto para cada una de las unidades experimentales haciendo uso de la fórmula simplificada de Hargreaves la cual se muestra en la Ecuación 7, y utiliza la temperatura, las cuales se obtuvieron de la información meteorológica brindada por la FJ Orlich & Hnos. Ltda. y la radiación extraterrestre, cuyo valor se obtiene de tablas, conociendo que Costa Rica se encuentra a 10° latitud Norte. Dicha tabla se muestra en el Anexo 8-1.

$$Eto = 0,023 \cdot (t_{med} + 17,78) \cdot R_0 \cdot (t_{máx} - t_{mín})^{0,5}$$

Ecuación 7

Eto = Evapotranspiración potencial (mm/día)

t_{med} = Temperatura media diaria(°C)

R₀ = Radiación solar extraterrestre, tabulada (mm/día)

t_{máx} = Temperatura máxima diaria (°C)

t_{mín} = Temperatura mínima diaria (°C)

4.6 Propuestas de diseño

4.6.1 Diseño agronómico

Se inició con el diseño agronómico para cada una de las propuestas. Como ya es conocida la información de la planta, profundidad de raíces y coeficiente de cultivo, también la información del suelo, CC, PMP, Dap y la información climática Eto, se pudo iniciar con la determinación de las láminas de riego.

Inicialmente se determinó el porcentaje de área bajo riego (PAR), haciendo uso del cuadro mostrado en el Anexo 8-2.

Se procedió a calcular la lámina neta (Ln) con la Ecuación 8.

$$Ln = \frac{CC - PMP}{100} \cdot \frac{Pe}{Pe_{H_2O}} \cdot Prof \cdot Ag \cdot PAR$$

Ecuación 8

Ln = Lámina neta (mm)

CC = Capacidad de campo (%)

PMP = Punto de marchitez permanente (%)

Pe = Peso específico (g/cm³)

Pe_{H₂O} = Peso específico del agua (g/cm³)

Prof = Profundidad radicular (mm)

Ag = Agotamiento (decimal)

PAR = Porcentaje de área bajo riego (%)

Seguidamente se realizó el cálculo de la evapotranspiración del gotero (E_{tg}), esto haciendo uso de la Ecuación 12, para la cual se debe determinar el coeficiente de localización (K₁), el cual se obtuvo como el promedio del valor obtenido de las ecuaciones Ecuación 9, Ecuación 10 y Ecuación 11.

$$K_1 = A + 0,5(1 - A)$$

Ecuación 9

$$K_1 = 1,34 \cdot A$$

Ecuación 10

$$K_1 = 0,1 + A$$

Ecuación 11

K_1 = Coeficiente de localización (adimensional)

A = Área sombreada/área total (adimensional)

Una vez obtenidos los valores de K_1 y promediados, se procedió a obtener el valor de E_{tg} con la Ecuación 12.

$$E_{tg} = E_{tc} \cdot K_1$$

Ecuación 12

E_{tg} = Evapotranspiración real del gotero (mm/día)

E_{tc} = Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

K_1 = Coeficiente de localización (adimensional)

Habiendo calculado el valor de la E_{to} con la Ecuación 7, entonces el valor de E_{tc} se calculó a partir de esta información y el coeficiente de cultivo, K_c , haciendo uso de la Ecuación 13.

$$E_{tc} = E_{to} \cdot K_c$$

Ecuación 13

E_{tc} = Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

E_{to} = Evapotranspiración potencial (mm/día)

K_c = Coeficiente de cultivo (adimensional)

Una vez que se tuvieron calculados los valores tanto de E_{tc} , como de E_{tg} , se procedió a realizar el cálculo de la frecuencia de riego (F_r), haciendo uso de la Ecuación 14. Con el valor

de la frecuencia ya calculado, se procedió a redondear este al valor entero más próximo y se recalculó la lámina neta haciendo uso de la Ecuación 15.

$$Fr = \frac{Ln}{Etg}$$

Ecuación 14

Fr = Frecuencia de riego (día)

Ln = Lámina neta (mm)

Etg = Evapotranspiración real de goteo (mm/día)

$$Ln = Fr \cdot Etg$$

Ecuación 15

Ln = Lámina neta (mm)

Fr = Frecuencia de riego (día)

Etg = Evapotranspiración real de goteo (mm/día)

Con la Ln recalculada, se procedió a calcular el valor de la lámina bruta haciendo uso de la Ecuación 16, para esto fue necesario hacer uso de la tabla presente en el Anexo 8-3 de donde se obtuvo el valor de la relación de transpiración (TR) y se asumió un coeficiente de uniformidad (CU), recomendado para el sistema de riego utilizado.

$$Lb = \frac{Ln}{TR \cdot CU}$$

Ecuación 16

Lb = Lámina bruta (mm)

Ln = Lámina neta (mm)

TR = Relación de transpiración (adimensional)

CU = Coeficiente de uniformidad (decimal)

Posteriormente se realizó el cálculo del tiempo de riego (Tr), este es el volumen que se debe aplicar sobre el caudal que se obtiene del número de emisores colocados en el área por el caudal de cada emisor (Q_o), dicho cálculo se realizó con la Ecuación 17.

$$Tr = \frac{Lb \cdot \text{Área}}{Q_o}$$

Ecuación 17

Tr = Tiempo de riego (horas)

Lb = Lámina bruta (m)

Área = Área (m²)

Q_o = Número de emisores por caudal de cada emisor (m³/h)

Como ya se tenía la calculado la Fr y el Tr para cada una de las unidades experimentales, se procedió a recaudar información con los encargados de cada finca sobre las horas disponibles para realizar las labores de riego. Con esta información se procedió a aplicar la Ecuación 18 para conocer el número de divisiones (N) que se deben realizar en el terreno.

$$N = \frac{Fr \cdot Hdisp}{Tr}$$

Ecuación 18

N = Número de divisiones (adimensional)

Fr = Frecuencia de riego (día)

Hdisp = Horas disponibles (horas)

Tr = Tiempo de riego (horas)

Una vez encontrado N para cada una de las unidades experimentales, se procedió a calcular el área de cada unidad (A_u), esto haciendo uso de la Ecuación 19.

$$A_u = \frac{A_T}{N}$$

Ecuación 19

A_u = Área de cada unidad (m^2)

A_T = Área total (m^2)

N = Número de divisiones (adimensional)

Con cada uno de los parámetros que fueron anteriormente calculados, se procedió a realizar el cálculo del caudal necesario para cada unidad de terreno. Para esto, se utilizó la Ecuación 20.

$$Q = \frac{A_u \cdot Lb}{T_r}$$

Ecuación 20

Q = Caudal necesario para cada unidad de riego (m^3/s)

A_u = Área de cada unidad (m^2)

Lb = Lámina bruta (m)

Tr = Tiempo de riego (s)

4.6.2 Diseño hidráulico

Habiendo calculado cada uno de los valores anteriores, fue posible iniciar con el diseño hidráulico para cada una de las unidades experimentales.

Se inició con los laterales, para esto se determinó con la Ecuación 21 el número de goteros por lateral N_{goteros} y seguidamente, con la Ecuación 22 el caudal de cada lateral Q_{lateral} , gracias a que se conocía el caudal de cada gotero Q_o .

$$N_{\text{goteros}} = \frac{L_{\text{lateral}}}{E_{\text{goteros}}}$$

Ecuación 21

N_{goteros} = Número de goteros (adimensional)

$L_{\text{laterales}}$ = Largo laterales (m)

E_{goteros} = Espaciamiento entre goteros (m)

$$Q_{\text{lateral}} = N_{\text{goteros}} \cdot Q_o$$

Ecuación 22

$Q_{\text{laterales}}$ = Caudal laterales (m^3/s)

N_{goteros} = Número de goteros (adimensional)

$Q_{\text{laterales}}$ = Caudal de cada gotero (m^3/s)

Al conocerse el tamaño de cada unidad, fue posible determinar el número de calles por unidad (N) con la Ecuación 23.

$$N = \frac{\text{ancho}_{\text{unidad}}}{\text{ancho}_{\text{calle}}}$$

Ecuación 23

N = Número de calles por unidad (adimensional)

ancho_{unidad} = Ancho unidad (m)

ancho_{calle} = Ancho calle (m)

Se finalizó el cálculo relacionado a los laterales calculando el número de laterales por división para esto se utilizó la Ecuación 24.

$$\frac{N^{\circ} \text{lat}}{\text{división}} = N \cdot \frac{\text{laterales}}{\text{calle}}$$

Ecuación 24

N° lat/división = Número de laterales por división (adimensional)

N = Número de calles por unidad (adimensional)

laterales/calle = Laterales por calle (adimensional)

Se pasó al diseño del múltiple, para esto se aplicó la regla del 20%, al valor obtenido se le sumó la diferencia de altura de la múltiple, más la diferencia de alturas del lateral, más las pérdidas en los laterales. Con el valor obtenido se procedió a calcular el diámetro de la múltiple utilizando la Ecuación 25.

$$D = \left[\frac{1,131 \times 10^9 \cdot Q^{1.852} \cdot L}{C^{1.852} \cdot Hf} \right]^{\frac{1}{4,872}}$$

Ecuación 25

D = Diámetro interno de la tubería (mm)

Q = Caudal (m³/h)

L = Longitud (m)

C = Coeficiente de Hazen Williams según tipo de material (adimensional)

Hf = Pérdidas de presión (m/m)

Posteriormente se procedió a realizar el cálculo de las presiones en distintos puntos con el fin de corroborar que cada uno de los diámetros seleccionados fue el correcto, para esto se realizó el cálculo de la presión en la entrada del lateral crítico (P_{el}) con la Ecuación 26, seguidamente se calculó la presión en la válvula (P_v) haciendo uso de la Ecuación 27, posteriormente se realizó el cálculo de la presión distal (P_d) con la Ecuación 28 y finalmente en el punto que se cree tendrá más presión (P_2) con la Ecuación 29.

$$P_{el} = P_o + Hf_L \pm -\Delta Z_L$$

Ecuación 26

P_{el} = Presión en la entrada del lateral (m)

P_o = Presión de operación (m)

Hf_L = Pérdidas admisibles en lateral (m)

ΔZ_L = Diferencia de altura en el lateral (m)

$$P_v = P_{el} + Hf_M \pm \Delta Z_M$$

Ecuación 27

P_v = Presión en la válvula (m)

P_{el} = Presión en la entrada del lateral (m)

Hf_M = Pérdidas admisibles en la múltiple (m)

ΔZ_M = Diferencia de altura en la múltiple (m)

$$P_d = P_V - Hf_M \pm \Delta Z_M - Hf_L \pm \Delta Z_L$$

Ecuación 28

P_d = Presión distal (m)

P_v = Presión en la válvula (m)

Hf_M = Pérdidas admisibles en la múltiple (m)

ΔZ_M = Diferencia de altura en la múltiple (m)

Hf_L = Pérdidas admisibles en lateral (m)

ΔZ_L = Diferencia de altura en el lateral (m)

$$P_2 = P_V - Hf_L \pm \Delta Z_L$$

Ecuación 29

P_2 = Presión en punto crítico (m)

P_v = Presión en la válvula (m)

Hf_L = Pérdidas admisibles en lateral (m)

ΔZ_L = Diferencia de altura en el lateral (m)

Para el cálculo de la tubería principal se debió determinar el número de válvulas que se pueden operar a la vez, conociendo este valor se procedió a calcular el diámetro de la tubería principal haciendo uso de la Ecuación 25, el diámetro obtenido se ajustó al diámetro comercial siguiente y se recalcularon las pérdidas en la línea.

Debido a la disposición que se tiene en la unidad experimental G, se debió calcular el diámetro de la línea de conducción de agua desde la fuente de abastecimiento hasta un tanque de almacenamiento ubicado en la parte alta de la finca. Al ser esta una tubería sin salidas se procedió a calcular el diámetro utilizando como criterio la velocidad admisible haciendo uso de la Ecuación 30.

$$A_{tubería} = \frac{Q}{V_{ad}}$$

Ecuación 30

$A_{tubería}$ = Área de la tubería (m²)

Q = Caudal en la tubería (m³/s)

V_{ad} = Velocidad admisible (m/s)

Una vez determinada el área de la sección de la tubería, se procedió a calcular el diámetro de esta haciendo uso de la Ecuación 31, para posteriormente redondearlo al diámetro siguiente mayor.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{tubería}}{\pi}}$$

Ecuación 31

d = Diámetro (m)

$A_{tubería}$ = Área de la tubería (m²)

En este caso, como el agua es impulsada desde la fuente a un tanque y se tenía que la llegada al tanque era a descarga libre, la carga dinámica total (CDT) para la bomba se tomó únicamente como la diferencia de altura de la fuente a la descarga, basados en los datos del levantamiento,

más las pérdidas de presión generadas en la tubería, las cuales se calcularon haciendo uso de la Ecuación 32.

$$Hf = 1,131 \times 10^9 \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \cdot L \cdot D^{-4,872}$$

Ecuación 32

Hf = Pérdidas de presión (m)

Q = Caudal (m³/h)

C = Coeficiente de Hazen Williams según tipo de material (adimensional)

L = Longitud (m)

D = Diámetro interno de la tubería (mm)

Para realizar el cálculo de las dimensiones del depósito necesario en la unidad experimental T, se procedió a aplicar la ecuación mostrada a continuación.

$$V = \frac{h}{3} \cdot (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2})$$

Ecuación 33

V = Volumen (m³)

A₁ = Área de la superficie (m²)

A₂ = Área del fondo (m²)

h = Profundidad (m)

Como en este caso se conoce el volumen que se desea almacenar, se procedió a determinar la profundidad que debería tener el reservorio, esto despejando la ecuación anterior, de donde se obtuvo la Ecuación 34. Haciendo uso de la Ecuación 35 y la Ecuación 36 se obtuvieron las áreas a utilizar en la Ecuación 34.

$$h = \frac{V \cdot 3}{(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2})}$$

Ecuación 34

h = Profundidad (m)

V = Volumen (m^3)

A_1 = Área de la superficie (m^2)

A_2 = Área del fondo (m^2)

$$A_1 = l_s \cdot a_s$$

Ecuación 35

A_1 = Área de la superficie (m^2)

l_s = Largo de la superficie (m)

a_s = Ancho de la superficie (m)

$$A_f = l_f \cdot a_f$$

Ecuación 36

A_2 = Área del fondo (m^2)

If = Largo del fondo (m)

af = Ancho del fondo (m)

4.7 Análisis económico

Se realizó el análisis económico para cada una de las propuestas.

Se inició con la identificación de los costos de materia prima (M.P) y la mano de obra directa (M.O.D) implicada en cada proyecto. Para la determinación de costos de materia prima se realizaron cotizaciones de los elementos necesarios y para los costos de mano de obra se realizó el cálculo de las horas necesarias para la instalación del proyecto y el salario mínimo para los trabajadores seleccionados.

Como es necesario realizar un flujo de efectivo, se realizó una estimación de los ingresos generados, esto basados en la experiencia que tienen los encargados de cada una de las fincas.

Una vez determinados los gastos y los ingresos se procedieron a calcular el VAN, el TIR y el PR con la Ecuación 37, Ecuación 38 y Ecuación 39 respectivamente.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - CF_0$$

Ecuación 37

VAN = Valor actual neto

CF_t = Flujos de caja futuro

k = Tasa de descuento

t = Tiempo

CF₀ = Inversión inicial

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1 + TIR)^t} - CF_0$$

Ecuación 38

TIR = Tasa Valor actual neto

CF_t = Flujos de caja futuro

t = Tiempo

CF_0 = Inversión inicial

$$PR = \frac{CF_0}{F}$$

Ecuación 39

PR = Periodo de retorno

CF_0 = Inversión inicial

F = Flujos de caja netos positivos

Con los resultados obtenidos, se evaluó la rentabilidad de cada uno de los proyectos.

4.8 Análisis ambiental

Para la realización del análisis ambiental se aplicó el formulario D1 de (SETENA, s/f), esto con el fin de conocer el paso a seguir, el cual puede ser desde la necesidad de hacer una declaración jurada de compromiso ambiental hasta tener que hacer una realizar un estudio de impacto ambiental.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Unidad experimental T

5.1.1 Ubicación del proyecto

La unidad experimental T, se encuentra ubicada en el distrito San José del cantón Naranjo, en la Finca V y G, a una altura aproximada de 1440 msnm, la unidad experimental seleccionada abarca un área de 7750 m², cultivados en su totalidad por café. La Figura 5-1 muestra el área de diseño de unidad experimental T.

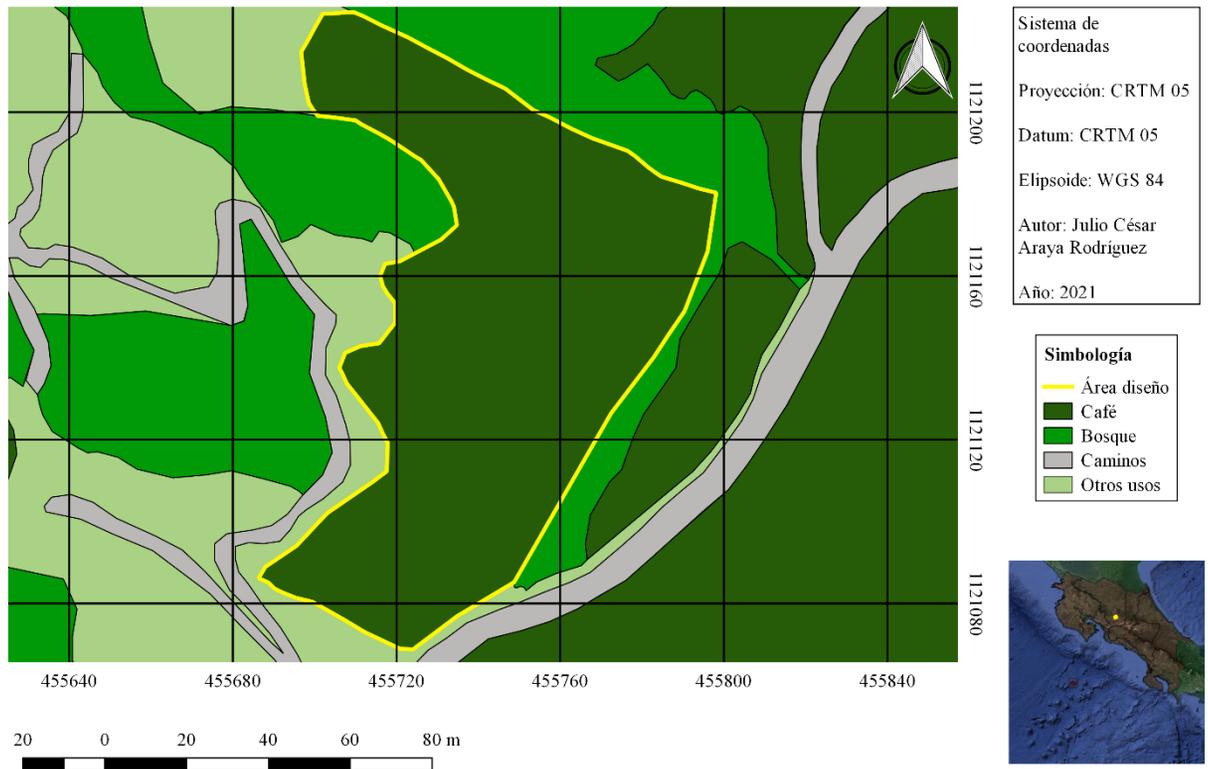


Figura 5-1 Área de diseño, unidad experimental T

5.1.2 Condiciones iniciales

Se identificó el equipo necesario para los análisis, en este caso únicamente se necesitaría una estación total (incluidos prima, bastón y trípode) para el levantamiento topográfico, un manómetro y un recipiente de volumen conocido para el aforo de la fuente la cual es una toma de agua que llega a la finca.

5.1.3 Condiciones topográficas

Una vez que los datos recolectados en el levantamiento topográfico fueron procesados, fue posible realizar las curvas de nivel para la unidad experimental. La Figura 5-2 muestra las curvas de nivel del área de diseño para la unidad experimental T.

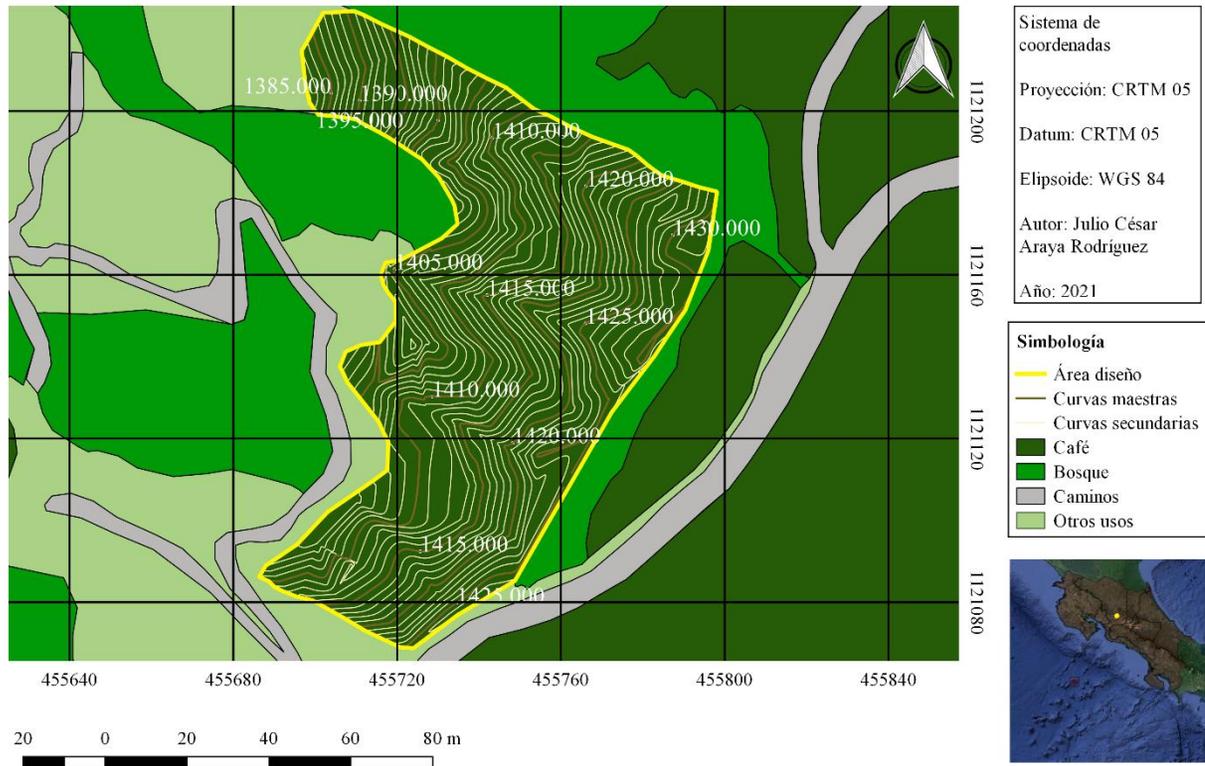


Figura 5-2 Curvas de nivel en área de diseño, unidad experimental T

Para esta área se tienen curvas de nivel maestras cada 5 metros y curvas de nivel secundarias cada 1 metro, como se puede observar, la diferencia de altura se encuentra entre los 15 metros y los 45 metros. Es importante resaltar que el café está sembrado sobre la curva de nivel, lo que da como resultado un diferencial de altura igual a 0 metros a lo largo de cada una de las calles. Como se mencionó anteriormente, esta unidad experimental tiene un área aproximada de 7750 m².

5.1.4 Fuente de agua

Se tiene como fuente de agua una tubería que llega a la finca, la misma se puede aprovechar en un 100 %. Se procedió a realizar el aforo descrito en la sección 4.3, en este caso se realizaron 5 repeticiones y se obtuvo el caudal promedio para utilizarlo como caudal de diseño, los resultados se muestran en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1 Caudal de la fuente de abastecimiento de la unidad experimental T

Repetición	Caudal (m ³ /h)	Caudal promedio (m ³ /h)
1	1,31	
2	1,28	
3	1,32	1,29
4	1,28	
5	1,27	

El cuadro anterior muestra los caudales obtenidos en cada una de las repeticiones y el caudal promedio obtenido de estos valores, el cual será el caudal utilizado para diseñar. Cabe destacar que a la unidad experimental llegan 2 tuberías con agua, de las cuales solo se aforó una de estas, considerando que la otra pueda ser utilizada para las demás labores de la finca.

5.1.5 Análisis físicos de suelo

Como se mencionó en la sección 4.4, los análisis de suelos fueron realizados por el CIA, los resultados obtenidos para dicho análisis se muestran en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2 Datos del suelo para la unidad experimental T

Profundidad muestreo (cm)	Tipo predominante	Pe (g/cm ³)	CC (%)	PMP (%)	Agua aprovechable (%)
30	Arcilloso	1,0	37,12	19,34	17,77

En el cuadro anterior se muestra el resumen de los datos obtenidos tras el muestreo de suelos, en este caso se observó un solo perfil de suelo para la profundidad de interés. Se tiene un tipo de suelo arcilloso con un porcentaje de agua aprovechable igual a 17,77 %, dicho porcentaje sería utilizado más adelante para la obtención de la lámina de riego.

5.1.6 Condiciones climáticas

El procedimiento descrito en la sección 4.5 fue aplicado para el mes de mayo con los datos obtenidos de la estación meteorológica más próxima a la unidad experimental, los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3 Eto para el mes de mayo en la unidad experimental T

Mes	Eto (mm/día)
Mayo	3,52

Una vez aplicada la Ecuación 7 se obtuvieron los resultados mostrados en el cuadro anterior, se seleccionó el mes de mayo, ya que, es cuando se espera que se tengan las primeras lluvias, las cuales deben inducir la floración del café, en caso de que no se presenten el sistema de riego está diseñado tomando como base la Eto de este mes.

5.1.7 Diseño agronómico

Determinados los diferentes parámetros iniciales, se procedió con el diseño agronómico, para esto se inició con la selección del tipo de cinta a utilizar, la cual entrega un caudal por gotero igual a 1 l/h, con un distanciamiento entre goteros de 30 cm. Por otra parte, se determinaron los parámetros faltantes para el diseño agronómico. Los datos se muestran en el Cuadro 5.4.

Cuadro 5.4 Profundidad, agotamiento, PAR y Eto para la unidad experimental T

Profundidad (mm)	Agotamiento (%)	PAR (%)	Eto (mm/día)
300	60%	45%	3,07

Iniciando por la profundidad radicular, se tienen 300 mm, ya que, según la teoría, es aquí donde se tiene el 80% de las raíces absorbentes en el café, el agotamiento utilizado fue del 60 %, mientras que el PAR obtenido del Anexo 8-2 fue de 45 % y finalmente aplicando la Ecuación 12 se obtuvo el valor de la Eto igual a 3,07 (mm/día).

Una vez obtenidos cada uno de los datos necesarios para el diseño agronómico, se procedió con el mismo, el Cuadro 5.5 muestra los resultados de dicho diseño.

Cuadro 5.5 Resultados del diseño agronómico sin redondear para la unidad experimental T

Ln (mm)	Etg (mm/día)	Fr (días)
14,40	3,07	4,68

Teniendo la frecuencia de riego, esta se redondeó y posteriormente se procedió a recalcular la lámina neta, la cual se utilizó para el cálculo de la lámina bruta y tiempo de riego. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.6 Resultados del diseño agronómico para la unidad experimental T

Ln (mm)	Fr (días)	Lb (mm)	Tr (h)
12,29	4,00	13,66	8,81

El cuadro anterior muestra el valor de la lámina neta recalculada, tomando como base una frecuencia de riego igual a 4 días y la Etg mostrada en el Cuadro 5.4 igual a 3,07 mm/día. Con esto se obtuvo una Ln igual a 12,29 mm. La Lb fue obtenida tras aplicar la Ecuación 16 con CU igual a 90 % y un TR igual a 1 obtenido del Anexo 8-3 con una profundidad de raíces inferior a 75 cm y una textura fina. El tiempo de riego para aportar la lámina necesaria en este caso es de 8 horas con 49 minutos.

5.1.8 Diseño hidráulico

Del diseño agronómico se obtuvo que el número de divisiones es igual a 4. Por lo tanto, el terreno fue dividido en 4 bloques de riego como se muestra en la Figura 5-3.

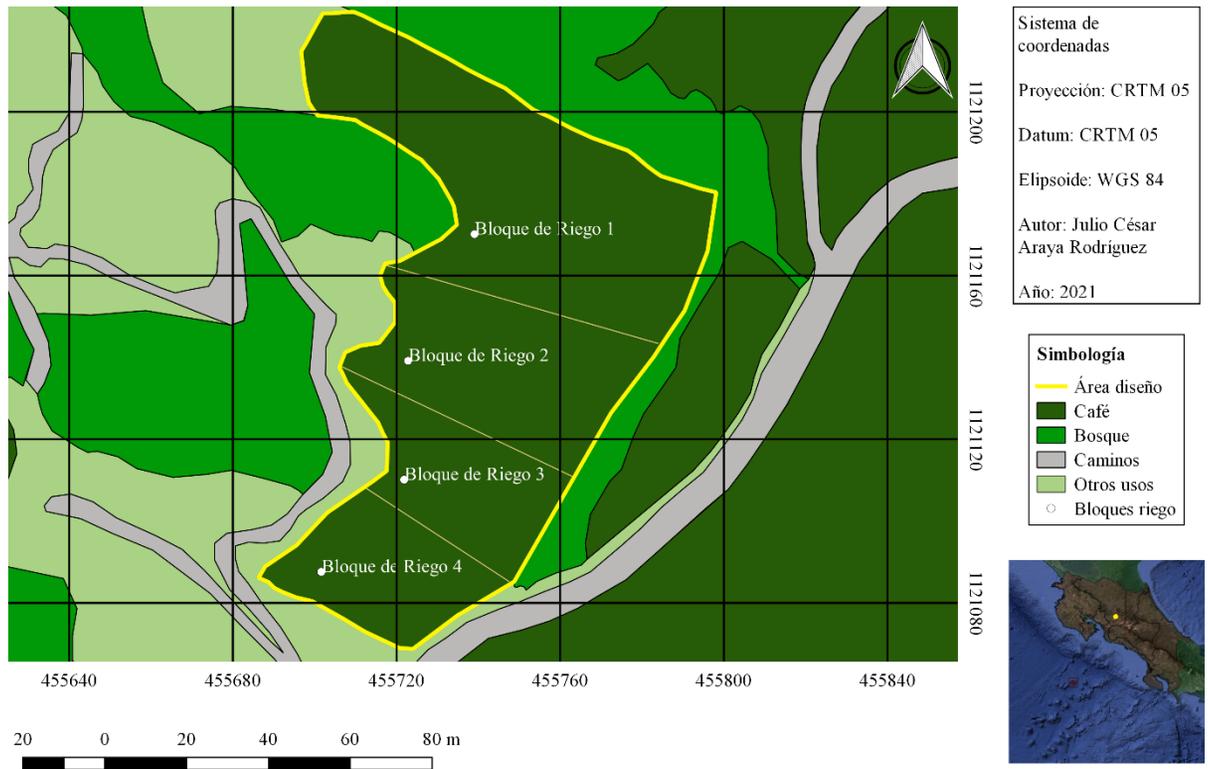


Figura 5-3 Bloques de riego para la unidad experimental T

Para el diseño de cada uno de estos bloques se tomó en consideración las características del terreno, con cada bloque de riego se busca facilitar los diseños necesarios, tanto de los laterales como de la múltiple.

Una vez realiza la división y haciendo uso de la información topográfica disponible, se obtuvo la pendiente de los laterales para cada bloque. El resultado se muestra en el Cuadro 5.7.

Cuadro 5.7 Pendiente en los laterales para la unidad experimental T

Bloque de riego	ΔZ Lateral (m)	Longitud media lateral (m)	Pendiente lateral (%)
1	0	45	0
2	0	48	0
3	0	25	0
4	0	50	0

Como se mencionó anteriormente, el cultivo está sembrado siguiendo la curva de nivel, con esto se obtiene, como se muestra en el cuadro anterior, una pendiente en el lateral igual a 0 %.

Seguidamente se procedió a realizar el análisis de la pendiente en la múltiple, los resultados se muestran en el Cuadro 5.8.

Cuadro 5.8 Pendiente para cada una de las múltiples en la unidad experimental T

Bloque de riego	ΔZ Múltiple (m)	Longitud de múltiple (m)	Pendiente múltiple (%)
1	38	95	40,00
2	28	65	43,08
3	24	60	40,00
4	19	40	47,50

Como se muestra en el cuadro anterior, para los cuatro bloques de riego se tiene pendientes que van desde el 40,00 % hasta 47,50 %.

Continuando con el diseño hidráulico del sistema de riego, se procedió a la selección de la cinta de riego, la información de cinta seleccionada se muestra en el Cuadro 5.9.

Cuadro 5.9 Cinta de riego para la unidad experimental T

Marca	Modelo	Q cinta (l/h)	Presión operación (m)
Netafim	UNIRAM CNL	1,00	10 - 40

Debido a la diferencia de altura que se tiene en el terreno, fue necesario implementar cintas de riego autocompensadas, esto con el fin de asegurar la uniformidad de riego. Gracias a las cintas de riego utilizadas y a una combinación de diámetros en la múltiple, que se mostrará más adelante, fue posible lograr entregar a cada lateral una presión que se encuentre dentro de la presión de operación de la cinta, lo que asegura que cada gotero entregue un caudal igual a 1 (l/h).

Una vez seleccionados los laterales de riego se procedió con el diseño de cada una de las múltiples, los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5.10.

Cuadro 5.10 Diámetro nominal y presión de operación de cada múltiple en la unidad experimental T

Bloque de riego	Dn (mm)	Po (m)
1	40 y 25	40
2	32	40
3	25	80
4	25	80

Como se muestra en el cuadro anterior, para el bloque 1 fue necesario realizar una combinación de diámetros con el fin de generar pérdidas de energía en el fluido y con esto poder asegurar que la presión en la entrada de cada uno de los laterales se encuentre dentro del rango de operación y que la presión en el gotero crítico no se inferior a la presión mínima de operación.

Para lograr trabajar con el caudal disponible, se debe contar con un reservorio con la capacidad de almacenar el volumen de agua necesario para cada ciclo de riego, esto porque el caudal instantáneo y la presión con que llega el agua a la finca no es suficiente para operar el sistema, haciendo uso de la Ecuación 34, la Ecuación 35 y la Ecuación 36 se obtuvieron las dimensiones que se recomiendan para dicho reservorio. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.11.

Cuadro 5.11 Dimensiones recomendadas para reservorio en unidad experimental T

	Largo (m)	Ancho (m)	A (m ²)	Profundidad (m)	Volumen (m ³)
A1	9	8	72	2,2	123,773
A2	7	6	42		

Conociendo la presión que se debe tener en la entrada de cada una de las múltiples, se procedió a calcular el diámetro nominal y la presión de operación de la tubería de conducción, desde el reservorio hasta el inicio de cada múltiple, los resultados se muestran en el Cuadro 5.12.

Cuadro 5.12 Diámetro nominal y presión de operación de la tubería desde el reservorio hasta cada una de las múltiples

Bloque de riego	Dn (mm)	Po (m)
1	40	25
2		
3	32	25
4		

Como se puede observar en el cuadro anterior las múltiples ubicadas en los bloques de riego 1 y 2 son alimentadas por una tubería con un diámetro nominal de 40 mm y una presión de operación de 25 m, por otro lado, las múltiples ubicadas en los bloques de riego 3 y 4 son alimentadas por una tubería de 32 mm de diámetro y una presión de operación de 25 m.

Continuando con el diseño hidráulico se procedió a hacer el cálculo del equipo de bombeo necesario para el sistema. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.13.

Cuadro 5.13 Características requeridas para el equipo de bombeo

Bloque de riego	CDT (m)	Q requerido (m ³ /h)
1	19,14	6,60
2	12,91	4,80
3	6,49	2,24
4	8,29	2,99

Con los datos obtenidos se procedió a buscar un equipo que cumpla con las condiciones críticas, en este caso las que se presentan en el bloque 1. Las características de equipo recomendado se muestran el Cuadro 5.14.

Cuadro 5.14 Características de la bomba seleccionada

Marca	Modelo	Q máximo (m ³ /h)	Carga máxima (m)
Aguastrong	EGP20-H	25	55

El equipo seleccionado es una motobomba con un motor a gasolina, esto porque no se tiene fácil acceso a la electricidad en la zona en que se debe colocar el equipo. Debido a las características de la bomba, es requerido contar con válvulas reguladoras de presión que permitan ajustar la presión de entrega al valor requerido en cada una de las múltiples.

Para completar el diseño hidráulico, a parte del equipo de bombeo y las tuberías seleccionadas, fueron necesarios más accesorios, entre los que se encuentra el sistema de filtrado y las válvulas a utilizar, las características de dichos accesorios se muestran en el Cuadro 5.15.

Cuadro 5.15 Equipo de filtrado y válvulas recomendadas

Accesorio	Características
Filtro de anillos	120 mesh
Válvulas de compuerta	Dn 40 mm
Válvulas de compuerta	Dn 32 mm
Válvulas de aire combinadas	Dn 25 mm
Válvula reguladora de presión	Dn 40 mm Po 30 - 10 m
Válvula antirretorno	Dn 40 mm
Válvulas de bola	Dn 32 mm

Las válvulas seleccionadas obedecen a las características del proyecto, mientras que el sistema de filtrado se seleccionó basado en las recomendaciones del fabricante de la cinta de riego.

5.1.9 Análisis económico

Como se describió en la sección 4.7, se determinó el costo de la materia prima (M.P) y la mano de obra directa (M.O.D) implicada en el proyecto, seguidamente se calcularon los egresos y los ingresos estimados, con esto se obtuvo un flujo neto de efectivo para 10 años, en el Cuadro 5.16 se muestra un resumen de dicho flujo de efectivo, en el Anexo 8-5 se muestra el flujo de efectivo completo.

Cuadro 5.16 Resumen flujo de efectivo unidad experimental T

	Año 0	Año 1	Año 5	Año 10
Inversión:				
- M.P.	₡3 435 235,07			
- M.O.D.	₡124 247,39			
Egresos:				
- Producción		₡1 657 225,30	₡1 658 048,54	₡1 659 078,16
- Operación		₡271 267,69	₡271 402,44	₡271 570,98
Ingresos:		₡2 727 471,21	₡2 728 826,03	₡2 184 416,41
Flujo de efectivo		₡798 978,23	₡799 375,05	₡253 767,27
Flujo de efectivo neto	-₡3 559 482,46	₡798 978,23	₡799 375,05	₡253 767,27

Es importante resaltar que, del costo total de la inversión (₡ 3 435 235) el 45 %, (₡ 1 529 069) se deben al costo de la cinta de goteo a utilizar. Esto principalmente por ser una cinta de riego autocompensada, además, ₡ 648 494 (aproximadamente el 20 % de la inversión) se debe a la necesidad de diseñar un reservorio capaz de almacenar el agua suficiente para un ciclo de riego. Con esto, se puede ver la relevancia que tiene la pendiente del terreno y las características de la fuente para este sistema de riego, sin embargo, tanto la utilización de cintas autocompensadas como la creación de un reservorio son elementales para el correcto funcionamiento del sistema, y responden a particularidades de la unidad experimental en estudio que son invariables, topografía y fuente de abastecimiento.

Con el flujo de efectivo, se procedió a realizar el cálculo del VAN, TIR y PR los valores obtenidos se muestra en el Cuadro 5.17.

Cuadro 5.17 Indicadores financieros para diseño en unidad experimental T

TMAR	VAN	TIR	P.R.
7,00%	€203 049,44	8%	5,52

Como se puede observar en el cuadro anterior, se tiene una un VAN positivo y una TIR superior a la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR), por lo que se puede considerar que el proyecto es rentable, esto con un periodo de retorno de 5 años y 6 meses.

5.1.10 Análisis ambiental

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.8, se obtuvo la información que se presenta en el Cuadro 5.18.

Cuadro 5.18 Resultados tras aplicar formulario D1 de la SETENA

Clasificación final SIA	Resultado
56	Declaración jurada de compromisos ambientales

En este caso, solo sería necesario realizar una declaración jurada de compromisos ambientales, ya que, la clasificación obtenida no sobre pasa los 300 puntos.

5.2 Unidad experimental G

5.2.1 Ubicación del proyecto

La unidad experimental G, se ubica en el distrito San José del cantón Grecia en la finca a cargo del productor German Guerrero Mejía, a una altura aproximada de 1275 msnm, la unidad experimental abarca un área de 4600 m² cultivados en su totalidad por café. La Figura 5-4 muestran el área de diseño de la unidad experimental G.

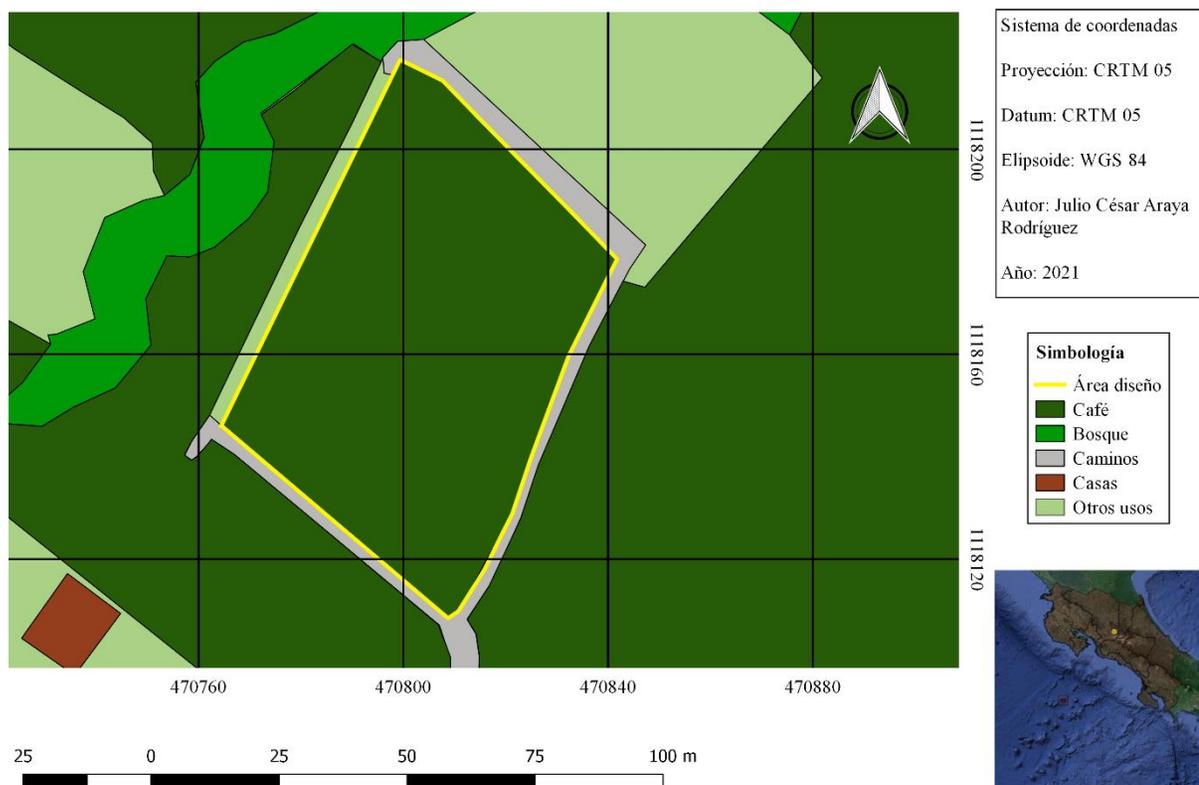


Figura 5-4 Área de diseño, unidad experimental G

5.2.2 Condiciones iniciales

Para esta unidad experimental se identificó, la necesidad de equipo topográfico, en este caso al igual que el anterior, una estación total (incluidos primas, bastón y trípode), además, debido a las características de la fuente se identificó la necesidad de equipo especializado para aforo de la fuente, en este caso un molinete con sus respectivos accesorios, la fuente en esta unidad experimental es el Río Tacares.

5.2.3 Condiciones topográficas

La Figura 5-5 muestran las curvas de nivel obtenidas para el área de diseño en la unidad experimental G.

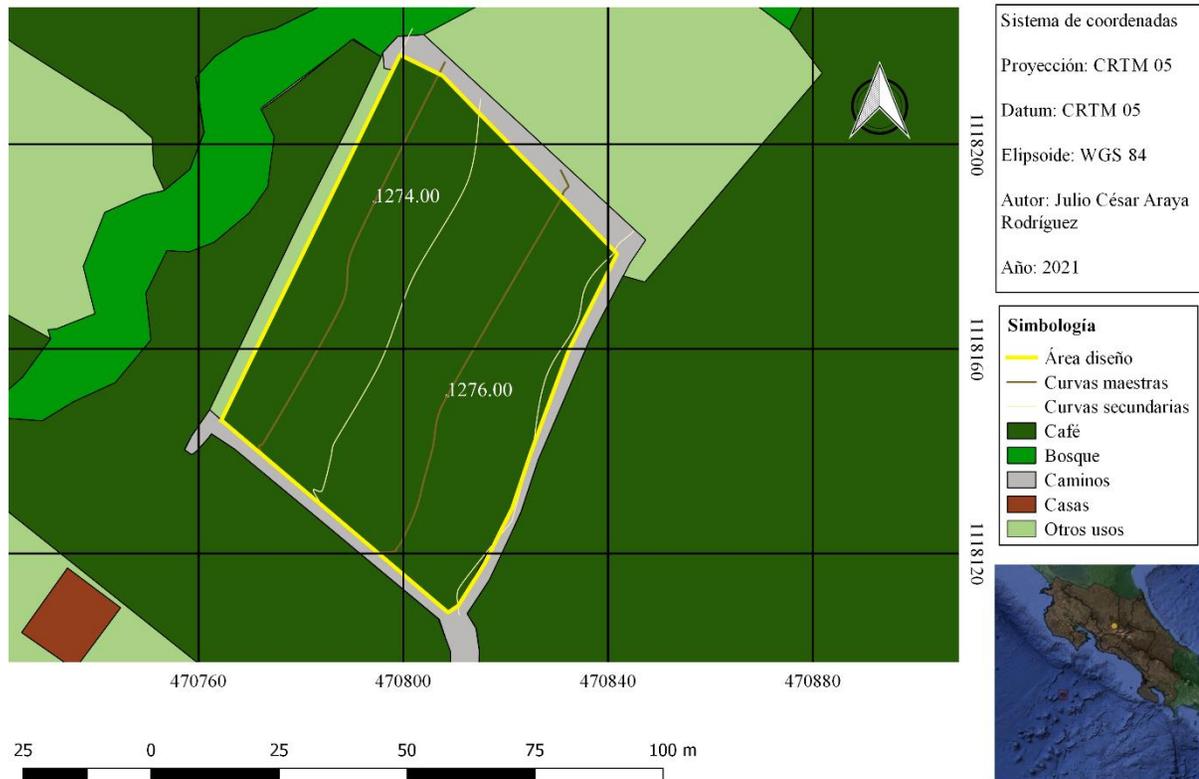


Figura 5-5 Curvas de nivel en área de diseño, unidad experimental G

Como se puede observar en la figura anterior, la cual cuenta con curvas maestras cada 2 metros y curvas secundarias cada 2 metros, en el área se tiene una diferencia de altura de aproximadamente 4 metros. Al igual que en la unidad experimental T, el cultivo está sembrado siguiendo la curva de nivel, lo que genera una diferencia de altura igual a 0 metros a lo largo de las calles. Para esta unidad experimental se tiene un área de 4600 m².

Por otra parte, la Figura 5-6 muestra las curvas de nivel desde la captación hasta el área de diseño para la unidad experimental G, en donde además se indica la ubicación de puntos importantes como el tanque y el inicio de la múltiple.

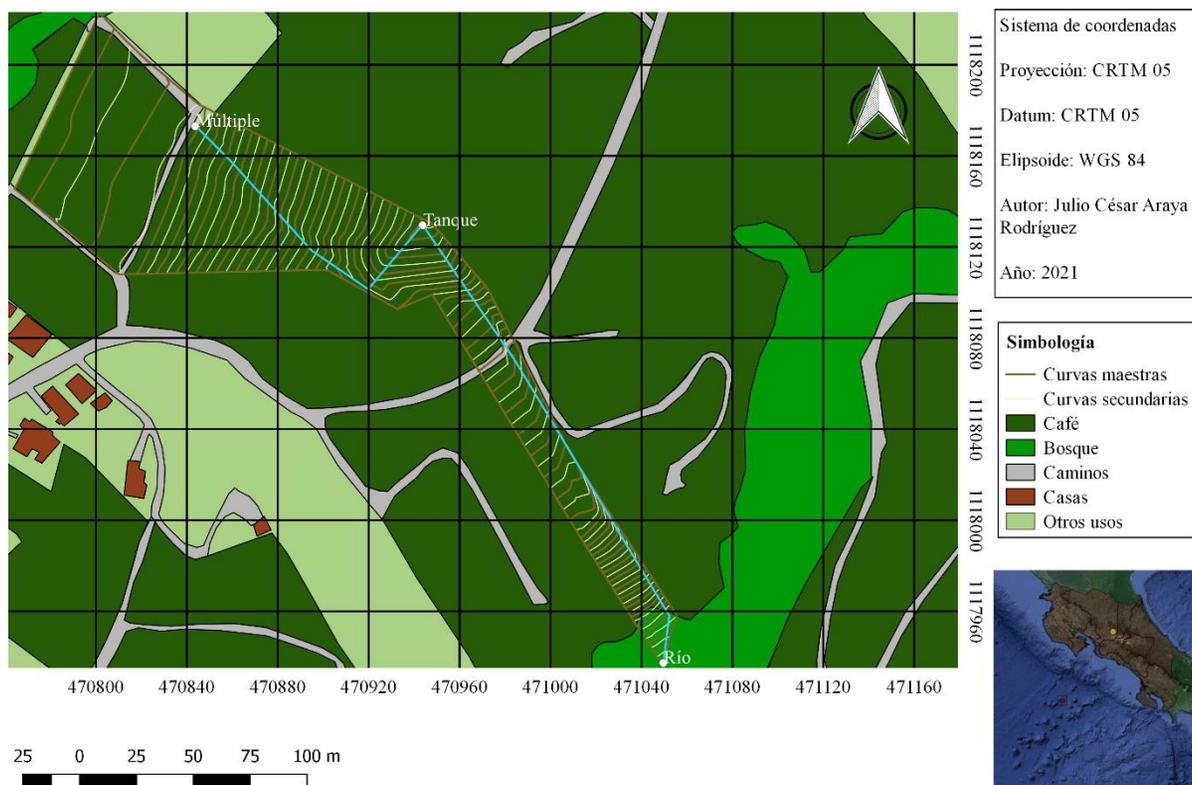


Figura 5-6 Curvas de nivel desde fuente hasta área de diseño, unidad experimental G

La figura anterior muestra las curvas de nivel desde el Río Tacares que se tiene como fuente de abastecimiento, de donde se debe bombear el agua hasta el tanque, siguiendo la línea de conducción que se marca como una línea azul en el mapa. Del tanque se conduce el agua hasta el inicio de la múltiple por gravedad. Al igual que en la Figura 5-5 se tienen curvas de nivel maestras cada 2 metros y curvas de nivel secundarios cada 2 metros.

5.2.4 Fuente de agua

La fuente de agua para esta unidad experimental es el Río Tacaras, el cual pasa por la parte baja de la finca. Para conocer el caudal disponible se siguió el procedimiento descrito en la sección 4.3, obteniendo los resultados que se muestran en el Cuadro 5.19.

Cuadro 5.19 Caudal de la fuente de abastecimiento para la unidad experimental G

Sección	Caudal (m ³ /h)	Caudal promedio (m ³ /h)
A	738,45	739,71
B	740,98	

Como se puede observar, se realizó el aforo a dos secciones del Río Tacares, la sección A aguas arriba de la zona en que se desea realizar la toma y la sección B aguas debajo de este punto. Como se muestra en la Figura 5-6, para la unidad experimental G, el agua debe ser bombeada desde el Río Tacares, hasta un tanque que tiene una cota 63 metros superior a la cota de dicho río y a una distancia, desde el río hasta el tanque que supera los 230 metros, esto para luego conducirla por gravedad desde el tanque hasta la múltiple, la cual tiene una cota 31 metros menor a la del tanque y siguiendo el recorrido de la tubería una distancia de 150 metros.

5.2.5 Análisis físicos de suelo

Como se mencionó en la sección 4.4.2, el análisis de suelos fue realizado por el CIA. Los resultados de dichos análisis se muestran en el Cuadro 5.20.

Cuadro 5.20 Datos del suelo para la unidad experimental G

Profundidad muestreo (cm)	Tipo predominante	Pe (g/cm ³)	CC (%)	PMP (%)	Agua aprovechable (%)
30	Franco Arenoso	0,7	18,52	10,24	8,29

En este caso, al igual que en el caso anterior, se tiene un solo perfil de suelo en la profundidad de interés, para esta zona se obtuvo un tipo de suelo franco arenoso, con un porcentaje de agua aprovechable igual al 8,29 %, este valor se utilizará más adelante para el cálculo de la lámina a regar.

5.2.6 Condiciones climáticas

El procedimiento descrito en la sección 4.5, fue aplicado para el mes de mayo con los datos obtenidos de la estación meteorológica más próxima a la unidad experimental en estudio, la Eto obtenida para este caso se muestra en el Cuadro 5.21.

Cuadro 5.21 Eto para el mes de mayo en la unidad experimental G

Mes	Eto (mm/día)
Mayo	4,27

Con la aplicación de la Ecuación 7, se obtuvo una Eto igual a 4,27 mm/día para el mes de mayo, como se explicó anteriormente, se utilizó este como el mes de referencia, ya que, es cuando se espera que se tengan las primeras lluvias del año, las cuales inducen la floración del café y es necesario que el sistema de riego este preparado para suplir la necesidad hídrica en dicho momento.

5.2.7 Diseño agronómico

Una vez determinados los diferentes parámetros iniciales, se procedió con el diseño agronómico, para esto se inició con la selección del tipo de cinta a utilizar, la cual entrega un caudal por gotero igual a 1 l/h, con un distanciamiento entre goteros de 30 cm. Por otra parte, se determinaron los parámetros faltantes para el diseño agronómico. Los datos se muestran en el Cuadro 5.22.

Cuadro 5.22 Profundidad, agotamiento, PAR y Eto para la unidad experimental G

Profundidad (mm)	Agotamiento (%)	PAR (%)	Eto (mm/día)
300	60%	35%	3,72

Iniciando por la profundidad radicular, se tienen 300 mm, ya que, según la teoría, es aquí donde se tiene el 80% de las raíces absorbentes en el café, el agotamiento utilizado fue del 60 %, mientras que el PAR obtenido del Anexo 8-2 fue de 35 % y finalmente aplicando la Ecuación 12 se obtuvo el valor de la Eto igual a 3,72 mm/día.

Una vez obtenidos cada uno de los datos necesarios para el diseño agronómico, se procedió con el mismo, el Cuadro 5.23 muestra los resultados de dicho diseño.

Cuadro 5.23 Resultados del diseño agronómico sin redondear para la unidad experimental G

Ln (mm)	Eto (mm/día)	Fr (días)
3,65	3,72	0,98

Con la frecuencia de riego calculada, se redondeó y posteriormente se procedió a recalculer la lámina neta, la cual se utilizó para el cálculo de la lámina bruta y tiempo de riego. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5.24.

Cuadro 5.24 Resultados del diseño agronómico para la unidad experimental G

Ln (mm)	Fr (días)	Lb (mm)	Tr (h)
3,72	1,00	4,35	2,61

El cuadro anterior muestra el valor de la lámina neta recalculada, tomando como base una frecuencia de riego igual a 1 días y la E_{tg} mostrada en el Cuadro 5.23 igual a 3,72. Con esto se obtuvo una L_n igual a 3,72 mm. La L_b fue obtenida tras aplicar la Ecuación 16 con CU igual a 90 % y un TR igual a 0,95 obtenido del Anexo 8-3 con una profundidad de raíces inferior a 75 cm y una textura media. El tiempo de riego para aportar la lámina necesaria en este caso es de 2 horas con 36 minutos.

5.2.8 Diseño hidráulico

Para la unidad experimental G, el diseño agronómico dio como resultado que el número máximo de divisiones en el terreno es igual a 3, sin embargo, debido a las características del terreno, este se puede regar como un solo bloque, además, el caudal instantáneo disponible logra cubrir las necesidades del sistema. El bloque de riego se muestra en la Figura 5-7.

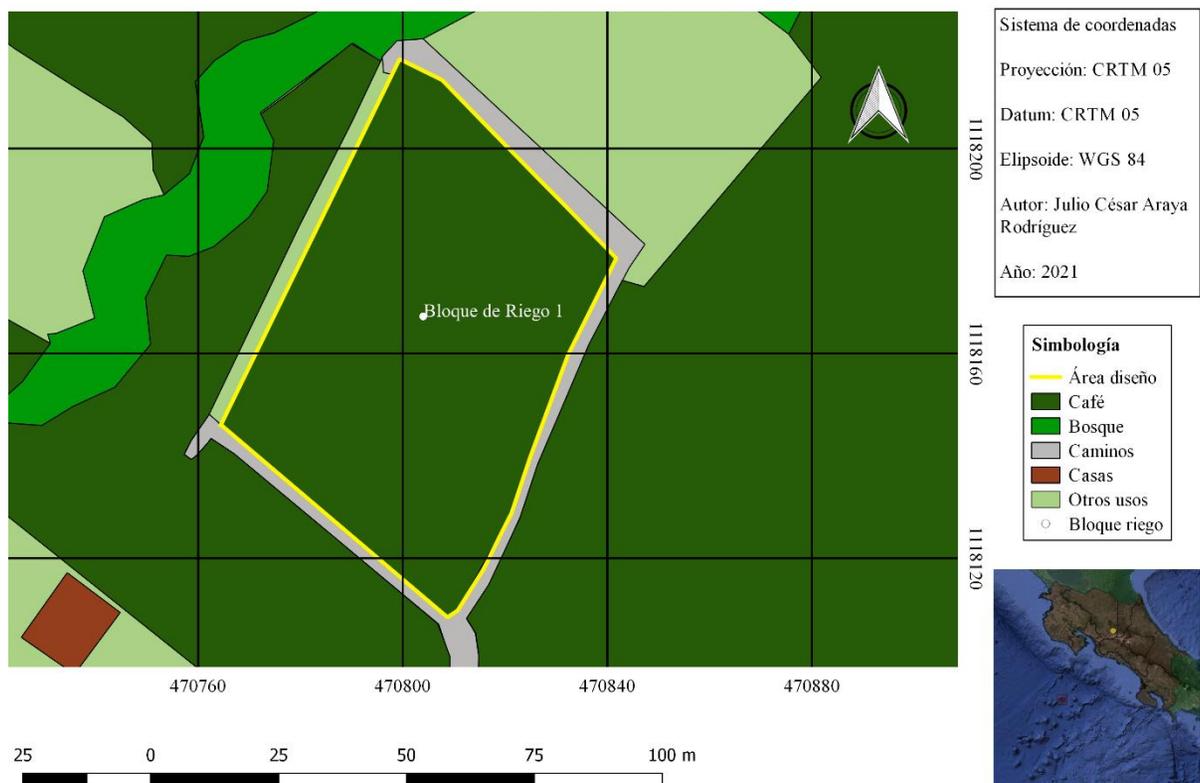


Figura 5-7 Bloque de riego para la unidad experimental G

Teniendo el bloque de riego con que se va a trabajar, se procedió a calcular el pendiente en los laterales de riego, esto haciendo uso de los datos obtenidos tras el análisis del levantamiento topográfico. Los resultados se muestran el Cuadro 5.25.

Cuadro 5.25 Pendiente en los laterales para la unidad experimental G

Bloque de riego	ΔZ Lateral (m)	Longitud media lateral (m)	Pendiente lateral (%)
1	0	75	0

Como se había mencionado en la sección 5.2.3, las calles siguen la curva de nivel, gracias a esto se tiene una pendiente a lo largo del lateral de 0 %.

Seguidamente, se realizó el análisis de la pendiente que se presenta a lo largo de la múltiple, los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5.26.

Cuadro 5.26 Pendiente para la múltiple en la unidad experimental G

Bloque de riego	ΔZ Múltiple (m)	Longitud de múltiple (m)	Pendiente múltiple (%)
1	3,9	58	6,72

Como se puede observar en el cuadro anterior, se tiene una pendiente leve a lo largo de la múltiple, lo que se verá reflejado más adelante en el tipo de cinta a utilizar y posteriormente en los costos del proyecto.

El Cuadro 5.27 muestra las características de la cinta de riego seleccionada para el diseño realizado en la unidad experimental G.

Cuadro 5.27 Cinta de riego para la unidad experimental G

Marca	Modelo	Q cinta (l/h)	Presión operación (m)
Netafim	Streamline X	1,00	8,00

Como se muestra en el cuadro anterior, para la unidad experimental G se seleccionó una cinta de riego no autocompensada, ya que, debido a la pendiente presentada a lo largo de la múltiple, no se presentan diferencias de presión entre el primer y último gotero superiores al 20 % de la presión de operación, en este caso 1,6 m, como se verá posteriormente, esto tiene una relevancia significativa en los costos del proyecto.

Seguidamente se realizaron los cálculos necesarios para determinar los diámetros necesarios en la múltiple y la presión de trabajo de cada una de esta. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.28.

Cuadro 5.28 Diámetros nominales y presiones de trabajo de las diferentes múltiples

Bloque de riego	Dn (mm)	Po (m)
1	40 y 32	25

Como se puede observar, en la múltiple fue necesario combinación de diámetros, esto con el fin de generar pérdidas de energía en el fluido, para asegurar que la diferencia de presión entre el primer y último gotero no supere el 20 % y así lograr que la diferencia de caudal entregado por los goteros no sea mayor al 10 % y con esto asegurar una buena uniformidad de riego. La diferencia de altura en el lateral hubiese sido posible solventarla utilizando cintas de riego

autocompensadas y sin la necesidad de realizar combinación de diámetros, sin embargo, esto aumentaría los costos del proyecto de manera significativa.

Posteriormente se procedió a realizar el cálculo de los diámetros de la tubería desde el tanque hasta inicio de la múltiple. En la unidad experimental G, se cuenta con un tanque en la parte más alta de la propiedad, por lo que, se calculó el diámetro de las tuberías necesarias, el resultado se muestra en el Cuadro 5.29.

Cuadro 5.29 Diámetro nominal y presiones de trabajo de la tubería desde el tanque hasta la múltiple

Bloque de riego	Dn (mm)	Po (m)
1	40	40

En este caso se tiene una sola múltiple, la cual es alimentada por una tubería de un solo diámetro desde el tanque ubicado en la parte más alta de la finca. En este caso, es necesaria la colocación de una válvula reguladora de presión al inicio de la múltiple, para asegurar que la presión de entrada de esta sea la correcta, en este caso 8,5 m.

Como se pudo observar en la Figura 5-6 y como se mencionó posteriormente en la sección 5.2.4, para la unidad experimental G, el agua se debe tomar desde el Río Tacaes, el cual tiene una diferencia de altura superior a 63 metros y una distancia mayor a 230 metros con respecto al tanque, por lo que, el agua debe ser bombeada desde el río hasta el tanque. Los requerimientos del equipo de bombeo muestran en el Cuadro 5.30.

Cuadro 5.30 Características requeridas para el equipo de bombeo

Bloque de riego	CDT (m)	Q requerido (m ³ /h)
1	69,905	7,250

Debido a la disposición de la fuente, se requiere una motobomba, ya que, no se tiene fácil acceso a electricidad, para cumplir con estas necesidades, se seleccionó el equipo de bombeo que se muestra en el Cuadro 5.31.

Cuadro 5.31 Características de la bomba seleccionada

Marca	Modelo	Q máximo (m ³ /h)	Carga máxima (m)
Torini	WP - 30DHIE	40	75

Como se puede observar, el equipo cumple con las características demandadas. Como será utilizada para llenar un tanque, no se tiene problema en que el caudal entregado sea mucho mayor al requerido, lo que fue de vital importancia en el momento de escoger el equipo fue que este cumpliera con el CDT requerido.

Para transportar el agua desde la fuente hasta el tanque se seleccionó la tubería con las características mostradas en el Cuadro 5.32.

Cuadro 5.32 Tubería de conducción desde la bomba al tanque

Dn (mm)	Po (m)
63	80

Como se muestra en el cuadro anterior, para la conducción del agua desde la fuente hasta el tanque de almacenamiento, es necesaria la implementación de tubería de 63 mm de diámetro nominal y con una presión de operación de 80 m, esto debido a la carga que se presenta a la salida del equipo de bombeo.

Además de las tuberías y los equipos ya mostrados, para completar el sistema de riego se requiere de más equipo, entre los cuales se encuentran los accesorios para las tuberías, las válvulas a utilizar y el sistema de filtrado necesario. El Cuadro 5.33 muestra las válvulas necesarias y el equipo de filtrado recomendado para el diseño en la unidad experimental G.

Cuadro 5.33 Equipo de filtrado y válvulas recomendadas

Accesorio	Características
Filtro de anillos	120 mesh
Válvulas de compuerta	Dn 40 mm
Válvulas de aire combinadas	Dn 25 mm
Válvula reguladora de presión	Dn 40 mm Po 5 - 15 m
Válvula antirretorno	Dn 63 mm
Válvulas de bola	Dn 40 mm

La selección de los accesorios se basó en las características de cada proyecto, las características del sistema de filtrado que se seleccionó se basan en la recomendación del fabricante de la cinta de riego y el material que se quiera separa.

5.2.9 Análisis económico

Para finalizar, se tiene los resultados del análisis económico realizado para este diseño. El Cuadro 5.34 muestra un resumen del flujo de efectivo, en el Anexo 8-6 se muestra la tabla completa.

Cuadro 5.34 Resumen flujo de efectivo unidad experimental G

	Año 0	Año 1	Año 5	Año 10
Inversión:				
- M.P.	¢2 622 511,22			
- M.O.D.	¢82 256,95			
Egresos:				
- Producción		¢983 643,40	¢984 132,04	¢984 743,17
- Operación		¢38 940,00	¢38 959,34	¢38 983,54
Ingresos:		¢1 618 886,14	¢1 619 690,29	¢1 296 556,84
Flujo de efectivo		¢596 302,74	¢596 598,91	¢272 830,13
Flujo de efectivo neto	-¢2 704 768,17	¢596 302,74	¢596 598,91	¢272 830,13

Como se puede observar en el cuadro anterior, los costos de materia prima del proyecto son de ¢2 622 511 colones, de los cuales, el 30,1 % (¢ 780 000) se deben el costo del equipo de bombeo, además, un 30,4 % (¢ 789 632) se destinan a la compra de tubería desde la fuente de agua hasta el tanque, por lo que, como se puede observar, más del 60 % de la inversión se debe realizar debido a la ubicación de la fuente de abastecimiento, lo cual es una particularidad del finca y además característica invariable de esta.

Con el flujo de efectivo, se procedió a realizar el cálculo del VAN, TIR y PR, los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5.35.

Cuadro 5.35 Indicadores financieros para diseño en unidad experimental G

TMAR	VAN	TIR	P.R.
7,00%	¢386 268,88	10%	5,65

Como se puede observar, se tiene un VAN positivo y una TIR, mayor a la TMAR, lo que indica que el proyecto es rentable, esto con un periodo de retorno de 5 años y 7 meses.

5.2.10 Análisis ambiental

Una vez aplicado el procedimiento descrito en la sección 4.8 se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 5.36.

Cuadro 5.36 Resultados tras aplicar formulario D1 de la SETENA

Clasificación final SIA	Resultado
70	Declaración jurada de compromisos ambientales

Como se muestra en el cuadro anterior, la clasificación SIA obtenida para el proyecto es menor a 300, por lo que, se tiene como resultado que se debe realizar una declaración jurada de compromisos ambientales.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Gracias a la evaluación de las condiciones que presenta cada una de las unidades experimentales, fue posible identificar las características topográficas, hídricas, edáficas y climáticas presentes. Para la unidad experimental T se tiene un área de 7750 m², con un porcentaje de pendiente promedio superior al 40 %, con una fuente de fácil acceso que entrega un caudal promedio de 1,29 m³/h, hay predominancia de suelo arcilloso y una Eto igual a 3,52 mm/día para el mes de mayo. Mientras tanto, la unidad experimental G abarca un área de 4600 m², con un porcentaje de pendiente de 6,72 %, con una fuente de difícil acceso con un caudal superior a 700 m³/h, un suelo franco arenoso y una Eto igual a 4,27 mm/día para el mes de mayo.

Se logró diseñar de manera exitosa cada uno de los sistemas de riego por goteo y sus sistemas de abastecimiento, tomando en consideración cada uno de los factores que influyen en las propuestas finales, y buscando los equipos que mejor se adaptan a cada una de las unidades experimentales. Para la unidad experimental T se obtuvo una Fr igual a 4 días, con una Lb de 13,66 mm y un tiempo de riego de 8 horas con 49 minutos, como parte del diseño hidráulico fue necesario dividir el terreno en 4 bloques de riego, por lo que se fue necesario el diseño de 4 diferentes múltiples. Por su parte, el diseño realizado para la unidad experimental G dio como resultado una Fr de 1 día, con una Lb igual a 4,35 mm y un Tr de 2 horas con 36 minutos, en este caso, gracias a las características del terreno, se puede trabajar como un solo bloque de riego, por lo que únicamente fue necesario el diseño de una tubería múltiple.

Realizando el análisis económico, ambos proyectos presentan un VAN positivo, siendo para la unidad experimental T igual a ¢203 049,44 y para la unidad experimental G igual a ¢386 268,88 que indica que los proyectos generarían beneficios, igualmente con la TIR, en los dos casos mayor a la TMAR, lo que dice que se puede aceptar el proyecto, y el PR con un valor de 5 años con 6 meses para la unidad experimental T y 5 años con 7 meses para la unidad experimental G, esto quiere decir que ninguna de las inversiones ser recuperaría antes de los 5 años, pero las dos se pagarían antes de cumplir 6 años. Además, fue posible identificar los parámetros más influyentes en el costo final de cada uno de los diseños, para la unidad experimental T se logró identificar que la cinta de riego a utilizar y el reservorio que se debe

diseñar representan más del 65 % de la inversión necesaria. Por otro lado, para la unidad experimental G, se logró identificar el sistema de bombeo (motobomba y tubería de conducción bomba – tanque) como el factor con mayor peso en la inversión inicial, representando un 60 % de esta. En ambas unidades experimentales, los factores con mayor peso en la inversión inicial se deben a condiciones invariables de cada finca. Finalizando con el análisis ambiental, ambos proyectos son viables, según el resultado obtenido es necesario únicamente una declaración jurada de compromisos ambientales.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda para la unidad experimental T, asegurar la disposición de agua, ya que, según mencionó una de las personas encargadas de la finca en ocasiones se tienen cortes en el flujo lo que podría comprometer el funcionamiento del sistema si no se atiende a tiempo.

Para la unidad experimental G se recomienda la implementación de un reservorio de mayor volumen, ya que, actualmente se cuenta con un reservorio de 1 m³, lo que dificulta de manera significativa la operación del sistema y se desaprovecha en gran medida las capacidades de la bomba.

Buscar otra fuente de abastecimiento para la unidad experimental T, que en conjunto con la fuente existente permita reducir el tamaño necesario del reservorio y por ende los costos de este.

Debido a la naturaleza del mercado del café, se presentan variaciones en su precio de venta cada año, por lo que se recomienda en ambos casos considerar la variación en el precio de la fanega con el fin de observar cómo se afecta el resultado del análisis económico.

7 BIBLIOGRAFÍA

- A.R.I. (2014). *A.R.I. D-040 | Válvula ventosa trifuncional*. <https://www.arivalves.com/es/products/water-supply/item/d-040-combination-air-valve-barak>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Arias Zuñiga, A. L. (2006). *Introducción a los estudios de impacto ambiental* (1a ed.). Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- ARMAS. (s/f). *ARMAS. Modelo 21 - Válvula de Retro - Lavado*. Recuperado el 12 de agosto de 2021, de <https://armas.com.tr/es-ES/Product/Groups/T2XOr12rC4C1q8UxTJqcgZk41sw871q8Uxw1h8i6q1h8i6q/Riego-Filtro-de-Retrolavado/Modelo-21-Valvula-de-Retro-Lavado>
- AZUD. (s/f). *Azud modular 100*. https://www.azud.com/wp-content/uploads/2019/04/AZUD_MODULAR_100-ESP.pdf
- Baca Urbina, G. (2016). *Evaluación de proyectos* (7a ed.). McGraw-Hill. <http://www.ebooks7-24.com.ezproxy.itcr.ac.cr/?il=4613&pg=1>
- Barquero Miranda, M. (2016). *Fisiología Del Cafeto: Un enfoque práctico de los órganos de la planta y su funcionamiento*. [http://www.mag.go.cr/informacion/imagenes-nama-cafe-taller/Fenologia del cafeto, un enfoque practico](http://www.mag.go.cr/informacion/imagenes-nama-cafe-taller/Fenologia%20del%20cafeto,%20un%20enfoque%20practico) (Barquero, MM) NAMA-Cafe.pdf
- Blanco Marigorta, E., Valarde Suárez, S., & Fernández Francos, J. (1994). *Sistemas de bombeo*.
- Bray. (2020). *Guía de anclaje*. https://www.bray.com/docs/default-source/manuals-guides/bolting-guides/bolting-wwashers-rev3_2_20_2019.pdf?sfvrsn=73ea2a47_14
- Calderón Córdova, J. R., & Pozo Calva, C. X. (2011). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para la pérdida de carga en tuberías y accesorios con simulación*. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito.
- CEDEX. (s/f). *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*.
- Ciancaglini, N. (2017). *Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico* (p. 10). [http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO _R001_Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico.pdf](http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO_R001_Guía%20para%20la%20determinación%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20método%20organoléptico.pdf)
- CICAFAE. (2020). *Guía técnica para el cultivo del café*. <http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/GUIA-TECNICA.pdf>
- Cisneros Zayas, E., Rey García, R., Martínez Varona, R., López Seijas, T., & Gonzáles Robaina, F. (2016). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el cafeto en la provincia de Pinar del Río. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2), 23–30. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v24n2/rcta04215.pdf>
- CONAGUA. (2007). Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento: conducciones. En *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento* (Números 978-968–5).

<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro10.pdf>

Deca. (s/f). *Básicos broncerías* (p. 97).

Descamps, P. (2017). *Técnicas para la producción sostenible de café frente al cambio climático*.

Dorot. (2019). *Catálogo de productos: Válvulas de retrolavado*.
<https://www.dorot.com/Files/Files/Dorot/EngineersLibrary/Catalogs/Backflushing/Black Flushing-Valves-Eng.pdf>

Espinoza Gutiérrez, C. L., Jiménez Boulanger, F., & Fonseca Retana, L. (2007). *Ingeniería económica* (1a ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.

FAO. (s/f). *Textura del suelo*.
http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

Flores Saira, A. F. (2018). *Hidrometría* [Universidad José Carlos Mariátegui].
https://repositorio.ujcm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12819/407/Aracely_Trabajo_de_suficiencia_titulo_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Genebre. (2020). *Válvula de Pie "YORK" con filtro*.
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwis6q6OrK7yAhWbk2oFHcX9CvQQFnoECACQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.genebre.es%2Fdownload%2Ffile%2FZG9jdW1lbnRvcy9maWN0YXNvMzE0MC5wZGY%3D&usq=AOvVaw3ho353NgQf577IrXdJ1ZCG>

GeoHidráulica. (2021). *GeoHidráulica*. Sistemas de bombeo: Tipos y sus funciones.
<https://geohidraulica.com/sistema-de-bombeo-tipos-y-sus-funciones/>

González, M. (2014). *Flujo de fluidos en fase líquida: Tubos, válvulas y accesorios*.
<https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2008/12/tema-tubos-tuberias-y-accesorios.pdf>

Gualancañay Miñarcaja, D. P., & Jaguaco Quiña, H. D. (2018). *Diseño de un sistema de bombeo para almacenamiento de agua de riego en los sectores de Chan Chico y Tiobamba de la Parroquia Eloy Alfaro, Canton Latagunga, provincia de Cotopaxi* [Universidad Técnica de Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4372/3/PI-000572.pdf>

Guevara Rodríguez, G., Vargas Obando, A., & Quesada Chanto, J. I. (2021). Prevención del golpe de ariete mediante el control del tiempo de cierre, al usar válvulas hidráulicas automatizadas. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(1), 143–154.
<https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4821>

Icafe. (2019). *Informe Final Proyecto: Actualización Área Cafetalera 2017 - 2018*.
<http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/Actualizacion-Area-Cafetalera-2017-2018.pdf>

Icafe, MAG, SENARA, & COOPRONARAJA, R. . (2016). *Icafe*. Evalúan Riego en Café para enfrentar Cambio Climático.

- IICA. (2019). Manual de producción sostenible de café. En *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)*. [http://www.mag.go.cr/informacion/imagenes-nama-cafe-taller/Fenologia del cafeto, un enfoque practico \(Barquero, MM\) NAMA-Cafe.pdf](http://www.mag.go.cr/informacion/imagenes-nama-cafe-taller/Fenologia%20del%20cafeto,%20un%20enfoque%20practico)
- INIA. (2015). Semana de la ciencia y tecnología jornada de puertas abiertas. *Inia*, 19. [http://inia.uy/Documentos/Públicos/INIA Tacuarembó/2015/El Suelo 20 de mayo.pdf](http://inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/El%20Suelo%2020%20de%20mayo.pdf)
- La Oficina de Agua Potable. (2011). *Válvulas de alivio de presión en los tanques de presión*. <https://www.doh.wa.gov/Portals/1/Documents/Pubs/331-429s.pdf>
- Liotta, M., Carrión, R., Ciancaglini, N., & Olgúin, A. (2015). Manual de capacitación riego por goteo. En *1° Edición Especial*. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf%0Afile:///C:/Users/SURI/OneDrive/Documentos/inta_manual_riego_por_goteo.pdf
- Martínez Barrera, L. (2000). *Operación Y mantención de equipos de riego para pequeños agricultores* (p. 28). <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/7030/NR25632.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez Menes, M., Fernández Reynoso, D., Castillo Vega, R., & Uribe Chávez, D. Y. (s/f). *Líneas de Conducción por gravedad* (p. 29). [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SAGARPA s.f. Líneas de Conducción por gravedad..pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SAGARPA_s.f._L%C3%ADneas_de_Conducci%C3%B3n_por_gravedad..pdf)
- MINAE, DCC, NAMA Café, MAG, Sector Agro Alimentario, & Icafe. (s/f). *Guía de “Auto contenido” de riego del bloque 1 del componente I: capacitaciones*. https://namacafe.org/sites/default/files/documentos/guia_tecnica_riego.pdf
- Monge Redondo, M. Á. (2018). *iagua*. Filtración (II): selección del equipo de filtrado. <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/filtracion-ii-seleccion-equipo-filtrado>
- Mora, N. (2008). *Agrocadena de café*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-9314.pdf>
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (Sexta). Educación, Pearson.
- OPS. (2005). *Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable*. [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS 2005b Guia diseño de bombeo.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS_2005b_Guia_dise%C3%B1o_de_bombeo.pdf)
- Pasinato, H. D. (2008). Fundamentos de mecánica de fluidos. En *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. http://www.edutecne.utn.edu.ar/mecanica_fluidos/mecanica_fluidos_2.pdf
- Pereira, P. (2021). *Entrevista realizada por Julio Araya*.
- Pirobloc. (2019). *Pirobloc*. Cálculo de pérdidas de carga. <https://www.pirobloc.com/blog-es/calculo-perdidas-carga/>

- Autoriza la siembra, cultivo, beneficiado y comercialización de Café “Coffea Canephora” en Costa Rica, (2018). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=86479&nValor3=112210&strTipM=TC
- Ramírez B, V. H., Arcila, J. P., Jaramillo, Á. R., Rendón-S, J. R., Cuesta, G. G., Menza F, H. D., Mejía M, C. G., Montoya, D. F., Mejía M, J. W., Torres N, J. C., Sánchez A, P. M., Baute B, J. E., & Peña Q, A. J. (2010). Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé*, 61(2), 132–158. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061\(02\)132-158.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061(02)132-158.pdf)
- Ruiz Canales, A., & Molina Martínez, J. M. (2010). *Automatización y telecontrol de sistemas de riego* (Primera).
- SETENA. (s/f). *DI*.
- Singer Valve. (2011). *Válvula sostenedora de presión* (pp. 135–138).
- Torres Hernández, A. (2013). *Manual de riego. Mantenimiento de un sistema de riego por goteo*. Andros, Santiago. http://sb.uta.cl/libros/30924-MANUAL_RIEGO_web.pdf
- Twyman, J. (2018). Golpe de ariete en una red de tuberías debido al cierre rápido de una válvula. *Revista Ingeniería en Construcción*, 33(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000200193>
- USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo* (p. 88). https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WI/Soil_Quality_Test_Kit_Guide.pdf
- Válvulas Internacionales. (2018). *Valvulas internacionales*. Válvulas: Conocimientos básicos sobre sus 5 principales diseños. <http://valvulasinternacionales.com.pe/blog/valvulas-conocimientos-basicos/>
- Vignola, R., Watler, W., Poveda Coto, K., & Vargas Céspedes, A. (2018). *Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en Costa Rica*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/reduccion-impacto-por-eventos-climaticos/Informe-final-cafe.pdf>
- Villafañe Avila, E., & Padilla Arenas, R. R. (2004). *Estado del arte y tendencias en válvulas automáticas para el control de flujo* [Universidad Tecnológica de Bolívar]. <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0024817.pdf>
- Villalobos Araya, M. (2008). *Fundamentos de riego* (Número 1).
- Villalobos Araya, M. (2019). *Apuntes curso Riego a presión Segundo semestre 2019*.
- Villón, M. (2004). *Cálculos hidrológicos e hidráulicos en cuencas hidrográficas* (1a ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica. https://www.academia.edu/16705366/Calculos_hidrologicos_e_hidraulicos_Maximo_Villon

Yamit Filtration. (2021). *F600 Sistemas de filtración con gravas*. <https://www.yamit-f.com/wp-content/uploads/2021/05/9006206000-F600-YAMIT-Spanish-Bermad.pdf>

8 ANEXOS

Anexo 8-1 Radiación extraterrestre diaria según latitud

(valores en MJ m⁻² día⁻¹)²

Hemisferio Norte												Lat. grad.	Hemisferio Sur											
Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.		Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
0,0	2,6	10,4	23,0	35,2	42,5	39,4	28,0	14,9	4,9	0,1	0,0	70	41,4	28,6	15,8	4,9	0,2	0,0	2,2	10,7	23,5	37,3	45,3	
0,1	3,7	11,7	23,9	35,3	42,0	38,9	28,6	16,1	6,0	0,7	0,0	68	41,0	29,3	16,9	6,0	0,8	0,0	3,2	11,9	24,4	37,4	44,7	
0,6	4,8	12,9	24,8	35,6	41,4	38,8	29,3	17,3	7,2	1,5	0,1	66	40,9	30,0	18,1	7,2	1,5	0,1	4,2	13,1	25,4	37,6	44,1	
1,4	5,9	14,1	25,8	35,9	41,2	38,8	30,0	18,4	8,5	2,4	0,6	64	41,0	30,8	19,3	8,4	2,4	0,6	5,3	14,4	26,3	38,0	43,9	
2,3	7,1	15,4	26,6	36,3	41,2	39,0	30,6	19,5	9,7	3,4	1,3	62	41,2	31,5	20,4	9,6	3,4	1,2	6,4	15,5	27,2	38,3	43,9	
3,3	8,3	16,6	27,5	36,6	41,2	39,2	31,3	20,6	10,9	4,4	2,2	60	41,5	32,3	21,5	10,8	4,4	2,0	7,6	16,7	28,1	38,7	43,9	
4,3	9,6	17,7	28,4	37,0	41,3	39,4	32,0	21,7	12,1	5,5	3,1	58	41,7	33,0	22,6	12,0	5,5	2,9	8,7	17,9	28,9	39,1	44,0	
5,4	10,8	18,9	29,2	37,4	41,4	39,6	32,6	22,7	13,3	6,7	4,2	56	42,0	33,7	23,6	13,2	6,6	3,9	9,9	19,0	29,8	39,5	44,1	
6,5	12,0	20,0	30,0	37,8	41,5	39,8	33,2	23,7	14,5	7,8	5,2	54	42,2	34,3	24,6	14,4	7,7	4,9	11,1	20,1	30,6	39,9	44,3	
7,7	13,2	21,1	30,8	38,2	41,6	40,1	33,8	24,7	15,7	9,0	6,4	52	42,5	35,0	25,6	15,6	8,8	6,0	12,2	21,2	31,4	40,2	44,4	
8,9	14,4	22,2	31,5	38,5	41,7	40,2	34,4	25,7	16,9	10,2	7,5	50	42,7	35,6	26,6	16,7	10,0	7,1	13,4	22,2	32,1	40,6	44,5	
10,1	15,7	23,3	32,2	33,8	41,8	40,4	34,9	26,6	18,1	11,4	8,7	48	42,9	36,2	27,5	17,9	11,1	8,2	14,6	23,3	32,8	40,9	44,5	
11,3	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9	46	43,0	36,7	28,4	19,0	12,3	9,3	15,7	24,3	33,5	41,1	44,6	
12,5	18,0	25,3	33,5	39,3	41,9	40,7	35,9	28,4	20,3	13,9	11,1	44	43,2	37,2	29,3	20,1	13,5	10,5	16,8	25,2	34,1	41,4	44,6	
13,8	19,2	26,3	34,1	39,5	41,9	40,8	36,3	29,2	21,4	15,1	12,4	42	43,3	37,7	30,1	21,2	14,6	11,6	17,9	26,2	34,7	41,6	44,6	
15,0	20,4	27,2	34,7	39,7	41,9	40,8	36,7	30,0	22,5	16,3	13,6	40	43,4	38,1	30,9	22,3	15,8	12,8	18,9	27,1	35,3	41,8	44,6	
16,2	21,5	28,1	35,2	39,9	41,8	40,8	37,0	30,7	23,6	17,5	14,8	38	43,4	38,5	31,7	23,3	16,9	13,9	15,1	20,2	35,8	41,9	44,5	
17,5	22,6	29,0	35,7	40,0	41,7	40,8	37,4	31,5	24,6	18,7	16,1	36	43,4	38,9	32,4	24,3	18,1	15,1	16,2	21,2	36,3	42,0	44,4	
18,7	23,7	29,9	36,1	40,0	41,6	40,8	37,6	32,1	25,6	19,9	17,3	34	43,4	39,2	33,0	25,3	19,2	16,2	17,4	22,3	36,7	42,0	44,3	
19,9	24,8	30,7	35,5	40,0	41,4	40,7	37,9	32,8	26,6	21,1	18,5	32	43,3	39,4	33,7	26,3	20,3	17,4	18,5	23,3	37,1	42,0	44,1	
21,1	25,8	31,4	36,8	40,0	41,2	40,6	38,0	33,4	27,6	22,2	19,8	30	43,1	39,6	34,3	27,2	21,4	18,5	19,6	24,3	37,5	42,0	43,9	
22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0	28	43,0	39,8	34,8	28,1	22,5	19,7	20,7	25,3	37,8	41,9	43,6	
23,4	27,8	32,8	37,4	39,9	40,6	40,2	38,3	34,5	29,3	24,5	22,2	26	42,8	39,9	35,3	29,0	23,5	20,8	21,8	26,3	38,0	41,8	43,3	
24,6	28,8	33,5	37,6	39,7	40,3	39,9	38,3	34,9	30,2	25,5	23,3	24	42,5	40,0	35,8	29,8	24,6	21,9	22,9	27,2	38,3	41,7	43,0	
25,7	29,7	34,1	37,8	39,5	40,0	39,6	38,4	35,4	31,0	26,6	24,5	22	42,2	40,1	36,2	30,6	25,6	23,0	24,0	28,1	38,4	41,4	42,6	
26,8	30,6	34,7	37,9	39,3	39,5	39,3	38,3	35,8	31,8	27,7	25,6	20	41,9	40,0	36,6	31,3	26,6	24,1	25,0	28,9	38,2	41,2	42,1	
27,9	31,5	35,2	38,0	39,0	39,1	38,9	38,2	36,1	32,5	28,7	26,8	18	41,5	40,0	37,0	32,1	27,5	25,1	26,0	29,8	38,7	40,9	41,7	
28,9	32,3	35,7	38,1	38,7	38,6	38,5	38,1	36,4	33,2	29,6	27,9	16	41,1	39,9	37,2	32,8	28,5	26,2	27,0	30,6	38,7	40,6	41,2	
29,9	33,1	36,1	38,1	38,4	38,1	38,1	38,0	36,7	33,9	30,6	28,9	14	40,6	39,7	37,5	33,4	29,4	27,2	27,9	31,3	38,6	40,2	40,6	
30,9	33,8	36,5	38,0	38,0	37,6	37,6	37,8	36,9	34,5	31,5	30,0	12	40,1	39,6	37,7	34,0	30,2	28,1	28,9	32,1	39,0	39,8	40,0	
31,9	34,5	36,9	37,9	37,6	37,0	37,1	37,5	37,1	35,1	32,4	31,0	10	39,5	39,3	37,8	34,6	31,1	29,1	29,8	32,8	39,3	39,3	39,4	
32,8	35,2	37,2	37,8	37,1	36,3	36,5	37,2	37,2	35,6	33,3	32,0	8	38,9	39,0	37,9	35,1	31,9	30,0	30,7	33,4	39,6	38,4	38,8	
33,7	35,8	37,4	37,6	36,6	35,7	35,9	36,9	37,3	36,1	34,1	32,9	6	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	39,8	38,2	38,2	
34,6	36,4	37,6	37,4	36,0	35,0	35,3	36,5	37,3	36,6	34,9	33,9	4	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	39,7	38,0	37,6	
35,4	37,0	37,8	37,1	35,4	34,2	34,6	36,1	37,3	37,0	35,6	34,8	2	36,9	37,9	38,0	36,4	34,1	32,6	33,1	35,2	37,1	37,7	37,0	
36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6	0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	

¹ Los valores de R_e durante el día 15^{mo} del mes, proveen una buena estimación (error <1%) de R_e promediada de todos los días del mes. Solamente en casos de latitudes muy elevadas (mayores a 55° N o S) y durante los meses invernales, las desviaciones podrían ser mayores al 1 %.
² Los valores pueden ser convertidos a sus equivalentes en mm día⁻¹ si se dividen por Lambda = 2,45.

Fuente: (Allen et al., 2006).

Anexo 8-2 PAR para riego por goteo

Espaciamiento entre Laterales [m]	Porcentaje del área humedecido en el riego por goteo.														
	Descarga del Gotero ['lt/h]														
	Menos de 1.5			2			4			8			Más de 10		
	Textura del Suelo °)														
	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
	Espaciamiento de los goteros sobre el lateral de [m].														
	0.2	0.5	0.9	0.3	0.7	1.0	0.6	1.0	1.3	1.0	1.3	1.7	1.3	1.6	2.0
Porcentaje del área bajo riego (estimado) [%]															
0.8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
1.0	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	
1.2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	
1.5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	
2.0	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	
2.5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	
3.0	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	
3.5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	
4.0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	
4.5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	
5.0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	
6.0	5	12	20	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	

G = Textura Gruesa, Arenosa.
M = Textura Mediana, Franca
F = Textura Fina, Arcillosa

Fuente: tomado de apuntes de curso Riego a presión, segundo semestre 2019. (Villalobos Araya, 2019).

Anexo 8-3 Relación de transpiración en función de profundidad de raíces y textura del suelo

Profundidad raíces (m)	Textura			
	Muy arenosa	Arenosa	Media	Fina
< de 0,75	0,90	0,90	0,95	1,00
De 0,75 a 1,50	0,90	0,95	1,00	1,00
> de 1,50	0,95	1,00	1,00	1,00

Fuente: adaptado de (Villalobos Araya, 2019).

Anexo 8-4 Coeficiente F para laterales de aluminio y plástico en función del número de salidas

N° Salidas	Plástico (1.760)			Aluminio (1.852)		
	F ₁ ^a	F ₂ ^b	F ₃ ^c	F ₁ ^a	F ₂ ^b	F ₃ ^c
5	0.469	0.337	0.410	0.457	0.321	0.396
10	0.415	0.350	0.384	0.402	0.336	0.371
12	0.406	0.352	0.381	0.393	0.338	0.367
15	0.398	0.355	0.377	0.385	0.341	0.363
20	0.389	0.357	0.373	0.376	0.343	0.360
25	0.384	0.358	0.371	0.371	0.345	0.358
30	0.381	0.359	0.370	0.368	0.346	0.357
40	0.376	0.360	0.368	0.363	0.347	0.355
50	0.374	0.361	0.367	0.361	0.348	0.354
100	0.369	0.362	0.366	0.356	0.349	0.352
200	0.366	0.363	0.365	0.353	0.350	0.352

- ² (a): Cuando la distancia desde la entrada del lateral a la primera salida es E_{asp} (m).
 (b): Cuando la primera salida está cerca de la entrada del lateral.
 (c): Cuando la distancia desde la entrada del lateral a la primera salida es $E_{asp}/2$ (m).

Anexo 8-5 Flujo de efectivo unidad experimental T

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Inversión:											
- M.P.	€3 435 235,07										
- M.O.D.	€124 247,39										
Egresos:											
- Producción		€1 657 225,30	€1 657 431,07	€1 657 636,87	€1 657 842,69	€1 658 048,54	€1 658 254,41	€1 658 460,31	€1 658 666,24	€1 658 872,19	€1 659 078,16
- Operación		€271 267,69	€271 301,37	€271 335,05	€271 368,75	€271 402,44	€271 436,14	€271 469,84	€271 503,55	€271 537,26	€271 570,98
Ingresos:											
		€2 727 471,21	€2 182 247,90	€2 728 148,54	€2 182 789,83	€2 728 826,03	€2 183 331,88	€2 729 503,69	€2 183 874,08	€2 730 181,51	€2 184 416,41
Flujo de efectivo		€798 978,23	€253 515,46	€799 176,62	€253 578,39	€799 375,05	€253 641,33	€799 573,53	€253 704,29	€799 772,06	€253 767,27
Flujo de efectivo neto	-€3 559 482,46	€798 978,23	€253 515,46	€799 176,62	€253 578,39	€799 375,05	€253 641,33	€799 573,53	€253 704,29	€799 772,06	€253 767,27

Anexo 8-6 Flujo de efectivo unidad experimental G

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Inversión:											
- M.P.	€2 622 511,22										
- M.O.D.	€82 256,95										
Egresos:											
- Producción		€983 643,40	€983 765,54	€983 887,69	€984 009,85	€984 132,04	€984 254,23	€984 376,44	€984 498,67	€984 620,91	€984 743,17
- Operación		€38 940,00	€38 944,84	€38 949,67	€38 954,51	€38 959,34	€38 964,18	€38 969,02	€38 973,86	€38 978,70	€38 983,54
Ingresos:											
		€1 618 886,14	€1 295 269,72	€1 619 288,16	€1 295 591,38	€1 619 690,29	€1 295 913,12	€1 620 092,51	€1 296 234,94	€1 620 494,83	€1 296 556,84
Flujo de efectivo		€596 302,74	€272 559,35	€596 450,81	€272 627,02	€596 598,91	€272 694,71	€596 747,05	€272 762,41	€596 895,22	€272 830,13
Flujo de efectivo neto	-€2 704 768,17	€596 302,74	€272 559,35	€596 450,81	€272 627,02	€596 598,91	€272 694,71	€596 747,05	€272 762,41	€596 895,22	€272 830,13