



unl

Universidad
Nacional
de Loja

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

**FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS
NATURALES RENOVABLES**

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN EL
CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arábica* L.) EN EL CENTRO
BINACIONAL DE FORMACIÓN TÉCNICA
ZAPOTEPAMBA - PALTAS**

*Tesis de grado previa a
la obtención del título de
Ingeniero Agrícola*

Danny Armando Picoita Guerrero

Autor

Ing. Pedro Manuel Mesías Guaya Pauta Mg. Sc.

Director

Loja – Ecuador

2021

CERTIFICACIÓN DE TESIS

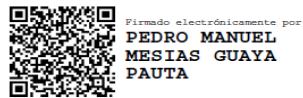
Ing. Pedro Manuel Mesías Guaya Pauta Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS.

CERTIFICA:

En calidad de director de la tesis titulada “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN EL CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN EL CENTRO BINACIONAL DE FORMACIÓN TÉCNICA ZAPOTEPAMBA – PALTAS**”, de la autoría del señor egresado de la carrera de Ingeniería Agrícola, Danny Armando Picoita Guerrero, ha concluido de acuerdo al cronograma aprobado y autorizo se continúe con el trámite de graduación.

Loja, 11 de septiembre de 2020



Ing. Pedro Manuel Mesías Guaya Pauta Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO

M. Sc. Luis Floresmilo Sivisaca Caraguay

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL CALIFICADOR DE LA TESIS

En calidad del Tribunal de Calificación de la Tesis titulada: “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN EL CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arábica* L.) EN EL CENTRO BINACIONAL DE FORMACIÓN TÉCNICA ZAPOTEPAMBA – PALTAS**”, de autoría del señor egresado de la Carrera de Ingeniería Agrícola, **Danny Armando Picoita Guerrero**, con cedula de identidad 1105362857, se informa que la misma ha sido revisada e incorporadas todas las observaciones realizadas por el Tribunal Calificador, y luego de su revisión se ha procedido a la respectiva calificación. Por tanto, autorizo la versión final de la tesis y la entrega oficial para la sustentación pública.

Atentamente,

Loja, 23 de septiembre 2021



Firmado electrónicamente por:
**LUIS FLORESMILO
SIVISACA
CARAGUAY**

M.Sc. Luis Floresmilo Sivisaca Caraguay

PRESIDENTE TRIBUNAL DE GRADO



Firmado electrónicamente por:
**MIGUEL
ANGEL**

M.Sc. Miguel Ángel Villamagua

VOCAL DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firmado electrónicamente por:
**WILMAN EDUARDO
ALDEAN GUAMAN**

M.Sc. Wilman Eduardo Aldeán Guamán

VOCAL DEL TRIBUNAL DE GRADO

AUTORÍA

Yo, Danny Armando Picoita Guerrero, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de la referida Tesis en el Repositorio Institucional- Biblioteca Virtual.

Firma:  Firmado electrónicamente por:
DANNY ARMANDO
PICOITA GUERRERO

Autor: Danny Armando Picoita Guerrero

Cédula: 1105362857

Fecha: 27 de octubre, 2021

CARTA DE AUTORIZACIÓN

Yo, Danny Armando Picoita Guerrero, declaro ser autor de la tesis titulada “**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN EL CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN EL CENTRO BINACIONAL DE FORMACIÓN TÉCNICA ZAPOTEPAMBA – PALTAS**”, como requisito para optar al grado de Ingeniero Agrícola; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja, para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los veintisiete días del mes de octubre de los dos mil veintiuno, firma el autor.

Firma:



Firmado electrónicamente por:
DANNY ARMANDO
PICOITA GUERRERO

Autor: Danny Armando Picoita Guerrero

Número de cedula: 1105362857

Dirección: Loja - Ecuador

Correo electrónico: dapicoitag@unl.edu.ec

Celular: 0997035908

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de tesis: Ing. Pedro Manuel Mesías Guaya Pauta Mg. Sc.

Tribunal de Grado: Ing. Luis Floresmilo Sivisaca Caraguay Mg. Sc. (Presidente)

Ing. Miguel Ángel Villamagua Mg. Sc. (Vocal)

Ing. Wilman Eduardo Aldeán Guamán Mg. Sc. (Vocal)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la sabiduría y valentía, para poder culminar esta etapa académica.

A la Universidad Nacional de Loja y en particular a la carrera de Ingeniería Agrícola, a toda su planta docente y de manera especial al director de tesis, Ing. Mg. Sc. Pedro Manuel Mesías Guaya Pauta, por brindarme su confianza, su esfuerzo, dedicación y sus conocimientos; de igual manera, al Ing. Mg. Sc. Carlos Valarezo M; al Ing. Mg. Sc. Luis Valarezo M; y, al Ing. Mg. Sc. Miguel Ángel Villamagua, por ofrecerme sus valiosos conocimientos para la terminación exitosa de la presente investigación.

Al centro Binacional Técnico Zapotepamba de la Universidad Nacional de Loja, por darme la oportunidad de realizar el presente trabajo de tesis.

Finalmente agradezco a mis familiares, amigos y aquellos, que en los momentos más difíciles supieron brindarme su apoyo incondicional, en este proceso de formación académica.

El Autor

DEDICATORIA

El presente trabajo de tesis lo dedico a mis padres Juan Picoita y Edith Guerrero, quienes me brindaron su confianza, su apoyo incondicional tanto emocional como económicamente, para culminar esta etapa profesional de mi vida.

A mi hermano Jeisson Picoita Guerrero, por su cariño y apoyo todos estos años, por sus palabras de aliento y motivación en todo momento para culminar esta meta en mi vida.

A todas mis tías y tíos y demás familiares y amigos, quienes, de una u otra manera me supieron brindar todo su apoyo de forma desinteresada, para afrontar todas las adversidades, superar los retos y así lograr la culminación exitosa de esta etapa académica.

Danny Armando Picoita Guerrero

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA.....	I
CERTIFICACIÓN DE TESIS.....	II
CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO.....	III
AUTORÍA.....	IV
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
DEDICATORIA.....	VII
TABLA DE CONTENIDO.....	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
TABLA DE ANEXOS.....	XII
TABLA DE FIGURAS	XIII
TÍTULO.....	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 El cultivo de café.....	3
2.1.1 Aspectos generales del cultivo de café	3
2.2 El suelo.....	4
2.2.1 Propiedades físicas del suelo	5
2.3 Contenido de agua en el suelo.....	7
2.3.1 Formas de expresar en contenido de agua en el suelo	7
2.4 Energía del agua en el suelo.....	9
2.4.1 Potencial del agua en el suelo (ϕ_t)	10
2.4.1.4 <i>Potencial de presión</i> (ϕ_p).....	11
2.5 Curva de retención de humedad del suelo.....	11

2.5.1	Puntos importantes de la curva de retención de humedad	11
2.6	Riegos.....	13
2.6.5.3.	<i>Componentes de un sistema de riego por goteo</i>	16
2.7	Diseño de sistemas de riego por goteo	25
2.7.1	Diseño agronómico	25
2.7.2	Diseño Hidráulico	31
3.	MATERIALES Y METODOS	35
3.1	Localización del área de estudio	35
3.1.1	Ubicación geográfica	36
3.1.2	Aspectos Biofísicos.....	36
3.2	Materiales y equipos de campo	37
3.2.1	Materiales de laboratorio	37
3.2.2	Materiales de oficina.....	37
3.3	Metodología	37
3.3.1	Reconocimiento del área y fuente de agua del sitio de estudio	37
3.3.2	Levantamiento topográfico	38
3.3.3	Metodología para el primer objetivo.....	38
3.3.4	Metodología para el segundo objetivo.....	40
3.3.5	Elaboración del manual de manejo y operación del sistema de riego por goteo.....	62
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.1	Determinación de la superficie de riego.....	64
4.2	Descripción de la fuente abastecedora de agua y presión	64
4.3	Características morfológicas, constantes físicas e hidrofísicas del suelo.....	64
4.3.1	Suelos del Perfil 1 (P ₁ Z)	64
4.3.2	Constantes hidrofísicas del suelo	65
4.3.3	Evaluación de las condiciones físicas del suelo.....	67
4.3.4	Curva de retención de humedad.....	68

4.4	Diseño Agronómico del sistema de riego por goteo	68
4.4.1.	Requerimientos de riego para el cultivo de café	68
4.4.2.	Necesidad neta de agua del cultivo café	71
4.5	Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo	76
4.5.5.	<i>Dimensionamiento de la tubería secundaria</i>	82
4.6	Manual de manejo y operación del sistema de riego por goteo	83
4.6.1	Antecedentes	84
4.6.2.	Consideraciones generales al momento de instalar	84
4.6.3.	Consideraciones generales del sistema de riego por goteo	86
4.6.4.	Mantenimiento de los equipos de riego	86
4.6.5.	Operación del sistema de riego por goteo	88
5.	CONCLUSIONES	89
6.	RECOMENDACIONES	90
7.	BIBLIOGRAFÍA	91
8.	ANEXOS	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación botánica de la variedad Coffe Arábica L.	3
Tabla 2. Valores de pF y su equivalente en atmosferas	12
Tabla 3. Régimen hidráulico de los emisores	22
Tabla 4. Tipos de emisores y el exponente de descarga	23
Tabla 5. Coeficiente de variación por fabricación.	25
Tabla 6. Eficiencias de aplicación del agua según el método de riego	30
Tabla 7. Categorías para evaluar el coeficiente de uniformidad.....	34
Tabla 8. Estaciones meteorológicas utilizadas para determinar la ETo.....	42
Tabla 9. Estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo de la precipitación efectiva. ..	45
Tabla 10. Determinación de las características físicas e hidrofísicas del suelo.....	65
Tabla 11. Rangos importantes de la curva característica de humedad del suelo	67
Tabla 12. Requerimientos de riego para el cultivo de café.	69
Tabla 13. Dimensionamiento de tuberías del sistema de riego por goteo.....	83
Tabla 14. Textura y densidad del suelo.....	108
Tabla 15. Contenidos de humedad (% θ_v) para los horizontes 0,0 – 20,0 y 20,0 – 40,0 cm de profundidad.	109
Tabla 16. Estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.	110
Tabla 17. Datos meteorológicos de las estaciones Quilanga, Yangana y Zapotillo (período 1990-2015).....	110
Tabla 18. Valores de kc y etapas de desarrollo del cultivo de café.	113

TABLA DE ANEXOS

Anexo 1. Descripción de perfiles de la unidad de suelo del sector Centro Binacional Técnico Zapotepamba del Perfil 1 (P1Z).....	104
Anexo 2. Determinación de la textura del suelo.....	106
Anexo 3. Determinación de la evaluación de las condiciones físicas del suelo.....	108
Anexo 4. Resultados de las constantes hidrofísicas del suelo.....	108
Anexo 5. Estaciones meteorológicas de estudio y correlaciones.....	110
Anexo 6. Ficha técnica del gotero Naandanjain. J-Turbo Key Plus no compensante 4 (1 h -1).	114
Anexo 7. Diseño hidráulico de las tuberías del sistema de riego por goteo.....	115
Anexo 8. Respaldo fotográfico.....	120
Anexo 9. Presupuesto general.....	122
Anexo 10. Plano topográfico de la zona de estudio.....	125
Anexo 11. Diseño del sistema de riego por goteo.....	126
Anexo 12. Planimetría y perfil de la línea de conducción.....	127
Anexo 13. Detalles técnicos del sistema de riego por goteo.....	128

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Relación caudal - presión	24
Figura 2. Curva generalizada del coeficiente (kc) del cultivo	28
Figura 3. Ubicación geográfica del Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba Paltas	35
Figura 4. Coeficiente de advección de acuerdo con el área del terreno.....	48
Figura 5. Perfil 1	65
Figura 6. Curva de retención de humedad del suelo.....	68
Figura 7. Tipo de gotero seleccionado.....	73
Figura 8. Regresión entre la presión y caudal del gotero.....	77
Figura 9. Relación entre la variación de caudal (Δq) y la variación de presión (Δh) para diferentes valores del exponente x.....	82
Figura 10. Clase textural y proporción de la fracción de suelo.	107
Figura 11. Diagrama triángulos para la evaluación de las condiciones físicas del suelo.	108
Figura 12. Correlación lineal de Pearson de los datos de temperatura máxima entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.	111
Figura 13. Correlación lineal de Pearson de los datos de temperatura media entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.....	112
Figura 14. Correlación lineal de Pearson de los datos de temperatura mínima entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.	112
Figura 15. Correlación lineal de Pearson de los datos de radiación solar entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.....	112
Figura 16. Curva del coeficiente del (kc) del cultivo de café.	113
Figura 17. Reconocimiento del área de estudio.....	120
Figura 18. Realización de calicatas y descripción de perfiles.	120
Figura 19. Levantamiento topográfico del área de estudio.....	121
Figura 20. Determinación de las constantes hidrofísicas en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Loja.	121

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN EL CULTIVO DE CAFÉ
(*Coffea arábica* L.) EN EL CENTRO BINACIONAL DE FORMACIÓN TÉCNICA
ZAPOTEPAMBA - PALTAS**

RESUMEN

La provincia de Loja estacionalmente atraviesa períodos de déficit hídrico, en los cuales el éxito de la producción agropecuaria está condicionada a la dotación de agua suplementaria, la misma que tiene que ser aplicada a través de un método que garantice la conservación del suelo, la optimización del agua y, una alta producción y productividad de los cultivos; es por ello que se realizó el presente estudio, siendo su principal objetivo, el de contribuir al manejo eficiente del suelo y agua a través del diseño de un sistema de riego por goteo para la producción de café (*Coffea arábica* L.) en el Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba. La textura del suelo para el primero y segundo horizontes fueron arcillosa y franco - arcillosa, en su orden; mientras que el promedio de la densidad aparente de los dos horizontes fue de $1,44 \text{ g cm}^{-3}$. El promedio de los contenidos de humedad en unidades de volumen de los dos horizontes para la saturación (pF: 0) fue de $47,9 \text{ \%}\theta_v$, capacidad de campo (pF: 2,52) $35,9 \text{ \%}\theta_v$; y, el punto de marchitez permanente (pF: 4,2) $30,8 \text{ \%}\theta_v$. La evaluación física del suelo fue de muy pobre. Los mayores requerimientos brutos de riego le corresponden al mes de septiembre con $4,1 \text{ mm día}^{-1}$; en tanto que el menor fue para el mes de mayo con $1,7 \text{ mm día}^{-1}$. Las necesidades totales de riego fueron de $13,3 \text{ litros día}^{-1} \text{ planta}^{-1}$. La lámina edáfica neta es de $3,9 \text{ mm}$. El tiempo de riego del sistema es de 2 horas y su frecuencia de 1 día. El caudal de diseño del sistema de riego es de $0,80 \text{ l s}^{-1}$. La presión máxima en la subunidad de riego se produjo al final del lateral ($10,7 \text{ m}$); en tanto, que la presión mínima ($9,8 \text{ m}$) se generó al inicio del lateral. La variación del caudal y de presión en la subunidad de riego es de $4,8 \text{ \%}$ y $8,5 \text{ \%}$ respectivamente. La carga total que requiere el sistema para su funcionamiento es de 19 metros; mientras que, la carga disponible por diferencia de nivel topográfica entre el reservorio y la parcela de riego es de 21 metros. El presupuesto total del sistema de riego por goteo es de \$ 1 235,34.

Palabras claves: cultivo de café, contenido y energía del agua en el suelo, diseño de riego por goteo.

ABSTRACT

The province of Loja seasonally goes through periods of water deficit, in which the success of agricultural production is conditioned to the provision of supplementary water, which has to be applied through a method that guarantees soil conservation, optimization water, and high production and productivity of crops; That is why this study was carried out, its main objective being to contribute to the efficient management of soil and water through the design of a drip irrigation system for coffee production (*Coffea Arábica* L.) at the Binational Training Center Zapotepamba technique. The soil texture for the first and second horizons were clayey and clay-loam, in their order; while the average of the apparent density of the first two horizons was $1,44 \text{ g cm}^{-3}$. The average of the moisture contents of the first two horizons for saturation (pF: 0) was 47,9 % θ_v , the field capacity (pF: 2,52) 35,9 % θ_v ; and, the permanent wilting point (pF: 4.2) 30,8 % θ_v . The physical evaluation of the soil obtained a result of very poor. The highest gross irrigation requirements correspond to the month of September with $4,1 \text{ mm day}^{-1}$; while the lowest was for the month of may with $1,70 \text{ mm day}^{-1}$. The total irrigation needs were $13,3 \text{ liters' day}^{-1} \text{ plant}^{-1}$. The net edaphic sheet is 3,9 mm. The system's irrigation time is 2 hours and its frequency is 1 day. The design flow of the irrigation system is $0,80 \text{ l s}^{-1}$. The maximum pressure in the irrigation subunit occurred at the end of the lateral (10,7 m); meanwhile, the minimum pressure (9,8 m) was generated at the beginning of the lateral. The variation in flow and pressure in the irrigation subunit is 4,8% and 8,5% respectively. The total load that the system requires for its operation is 19 meters; while the available load due to the difference in topographic level between the reservoir and the irrigation plot is 21 meters. The total budget for the drip irrigation system is \$ 1 235,34

Keywords: coffee cultivation, soil water content and energy, drip irrigation design.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación - FAO (2012), señala que, en los últimos cincuenta años se ha duplicado la superficie mundial de regadío. La distribución de la tierra y el agua difieren según el país, aunque solamente se utiliza una pequeña proporción de estos activos para la producción agrícola en el mundo, la mayor parte de los recursos son de fácil acceso económico y están dedicados a cultivos o a otros usos de interés ecológicos y ganancias económicas, por lo tanto, la posibilidad de ampliar las tierras cultivables es limitada a tal punto que en la actualidad más del 40 % de la población rural vive en regiones donde la escasez del agua para riego predomina.

Actualmente la superficie total de tierra cultivada con regadío representa el 20 % de la superficie total agrícola (325,1 millones de hectáreas) y en donde se produce el 40 % de los alimentos a nivel mundial. Asia es el continente con mayor superficie dedicada al riego con 232,7 millones de hectáreas (72 % de la superficie regada a nivel mundial); América con 52,2 millones de hectáreas; Europa, África y Oceanía suman 40,2 millones de hectáreas. Se considera que el 70 % del agua es utilizada por la agricultura de regadío a nivel mundial, en la cual el método de riego gravitacional es el más utilizado con el 94 % de la superficie total irrigada; mientras que el 6 % restante lo ocupan los métodos de aspersión y goteo (Arroyo, 2019).

INTAGRI (2017) señala que la aplicación de agua en la parcela alcanza altas eficiencias con el sistema de riego por goteo debido a que la forma de suministrar y mantener el agua en la zona radicular es constante y uniforme en condiciones en las que la planta se encuentra bajo tensión, la aplicación del agua mediante los goteros origina un humedecimiento en forma de cebolla en el interior del suelo denominado comúnmente bulbo húmedo.

La provincia de Loja se caracteriza por presentar una topografía muy irregular, con fuertes pendientes y escasas extensiones de territorio plano, en donde las áreas de regadío se manejan con sistemas tradicionales y de muy baja tecnificación, en donde el principal método de riego es por gravedad (inundación, melgas y surcos), el mismo que genera serios problemas, tales como: desperdicio de agua, erosión del suelo y lixiviación de los nutrientes.

El cultivo de café es un producto agroindustrial importante en el comercio internacional y su producción primaria juega un papel fundamental en la economía de muchos países, es el segundo producto más comercializado después del petróleo, se cultiva en 52 países en su mayoría de bajos ingresos (Bote et al., 2018). En Ecuador el café se cultiva en 23 provincias del país ubicándose entre las 10 especies con mayor superficie cultivada (Chamba, 2018). Las provincias de El Oro, Loja y Manabí representan 80 % del área cultivada de cafetales arábigos, el 20 % restante se distribuye en otras 19 provincias productoras (Duicela et al., 2017).

La Universidad Nacional de Loja, entre otros escenarios para la ejecución de programas y proyectos de investigación y de vinculación con la colectividad, cuenta con el Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba (CBFTZ), el mismo que se ubica en la parroquia Casanga, del cantón Paltas, provincia de Loja; donde las lluvias son irregulares y se presentan en dos épocas bien definidas: invierno en los meses comprendidos de diciembre a abril con 547,8 mm (82,7 %), y verano en los meses de mayo a noviembre con 147,2 mm (17,3 %). (Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Paltas, 2015-2019); de ello se desprende, que para satisfacer las necesidades de riego de los cultivos, es indispensable contar con agua suplementaria, y con la finalidad de no degradar el suelo y optimizar el agua de riego que es tan escasa en la zona, es necesario tener un método de riego tecnificado que satisfaga los requerimientos hídricos de los cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo y que permita alcanzar el máximo potencial productivo, motivo por el cual se realizó el presente diseño de riego por goteo para la producción del cultivo de café en el Centro Binacional de Formación Técnico Zapotepamba.

Para dar cumplimiento con el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo General

Contribuir al manejo eficiente del suelo y del agua a través del diseño de un sistema de riego por goteo para la producción del cultivo del café (*Coffea arábica* L.) en el Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo relacionadas con el riego.
- Diseñar un sistema de riego por goteo en el Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El cultivo de café

De acuerdo con Bettancourt (2002) citado por Villacís y Aguilar (2016), el género *Coffea* tiene alrededor de 80 especies originarias de África y Asia, constituyendo las variedades del *Coffea Arábica* L. y *Coffea Canephora* las de mayor importancia comercial, ocupando entre el 65 % y 33 % del área de superficie cultivada a nivel mundial respectivamente. En Ecuador la superficie cultivada es de aproximadamente 231 919 hectáreas, de la cual el 66 % (153 066 ha) corresponden a la variedad arábigo y el 34 % restante (78 852 ha) a la variedad robusta.

La clasificación botánica del café se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación botánica de la variedad *Coffea Arábica* L.

Reino:	Vegetal	Familia:	Rubiaceae
Subreino:	Angiosperma	Género:	<i>Coffea</i>
Clase:	Dicotiledónea	Especie:	<i>C. Arábica</i> L.
Orden:	Rubiales		

Fuente: Villacís y Aguilar (2016)

2.1.1 Aspectos generales del cultivo de café

Los aspectos generales del cultivo de café, se describen a continuación:

2.1.1.1 *Precipitación*

El cafeto requiere de adecuadas cantidades de lluvias para su buen desarrollo, especialmente en la etapa de floración, debido a que de ello depende su producción. Es así que, la aplicación de láminas de agua menores de 1 000 mm anuales limita el crecimiento y desarrollo de la planta reduciendo la cosecha del año siguiente; cuando la sequía es prolongada se propicia defoliación (caída de las hojas) e incluso la muerte de la planta (ICAFE, 2011).

2.1.1.2 *Temperatura*

La temperatura que beneficia al desarrollo del cafeto oscila de 19 a 21,5°C. Si es inferior a 19 °C se puede quemar los brotes y su producción es menor; y si es mayor a 21,5°C la vida productiva se acorta, la cosecha es temprana y más concentrada. El ataque de la roya es más

severo y se incrementan plagas como broca y minador, lo cual ocasiona una drástica baja en la productividad (Vanegas, 2016).

2.1.1.3 Altitud

La altitud adecuada para el cultivo de café fluctúa entre los 1 200 y 1 700 m s.n.m. A mayores altitudes se dan fuertes limitaciones con relación al desarrollo de la planta (Arias, 2018).

2.1.1.4 Vientos

Los vientos también son importantes en la producción del café, porque si superan los 30 km h⁻¹ se produce un daño en la planta con la caída de hojas, presencia de enfermedades, rotura de flores, y frutos y deshidratación de las yemas. Por ello es aconsejable seleccionar zonas protegidas de viento o crear cortinas rompe vientos naturales (Figuerola et al., (sf)).

2.1.1.5 Humedad relativa

Según Descroix et al. (2004) citado por Banegas (2009) el grado de humedad no debería ser mayor a 85 %, ya que lo cual ocasiona que el café sea vulnerable al ataque de enfermedades fungosas especialmente por hongos, bacterias que afectan las plantas en distintas etapas de su desarrollo provocando que se disminuya su crecimiento, producción y rendimiento. Por lo tanto, es conveniente que la humedad relativa idónea se encuentre entre 60 a 85 %.

2.1.1.6 Radiación solar

Según ICAFE (2011) los niveles de radiación solar para un buen desarrollo del café son de 300 a 450 cal cm² día⁻¹, la precipitación y la radiación solar son los dos elementos del clima de mayor importancia en la producción de café. Por lo tanto, es importante conocer los requerimientos hídricos para el cultivo de café.

2.2 El suelo

Angella et al. (2016) consideran al suelo como un depósito constituido por agua, aire y nutrientes que son tomados por la planta dependiendo de las cantidades y características que lo complementan, por lo que es importante conocer cómo se encuentran constituidas las fuerzas que ocasionan el movimiento y la retención del agua en el suelo.

2.2.1 Propiedades físicas del suelo

Es importante conocer el comportamiento y funciones del suelo, ya que las propiedades físicas influyen en el mismo, siendo estas el resultado de la interacción entre las distintas fases del suelo: sólido (suelo), líquido (agua) y gaseoso (aire) y la proporción en la que cada uno de estos elementos se encuentran, la condición física no solo influye en la distribución del tamaño de las partículas del suelo, sino también determina la capacidad de sostenimiento, penetración de raíces, capacidad de almacenamiento de agua, circulación del aire, drenaje entre y otros factores (Lambert et al., 2016).

Las propiedades físicas que influyen en el desarrollo del cultivo se las cita a continuación:

2.2.1.1 Textura

Calvache (2012) indica que la textura es la proporción de arena, limo y arcilla. Esta propiedad no cambia en el corto tiempo y puede ser determinada con la ayuda del triángulo textural al conocer los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en él. Los suelos se dividen en tres tipos debido a su facilidad de manejo y textura: pesados (arcillosos), medios (francos) y ligeros (arenosos).

Al hablar de frecuencias de riego, la textura conjuntamente con la profundidad del suelo, constituye un elemento importante para el mejoramiento y distribución del agua, la frecuencia es menor en suelos arenosos y en suelos arcillosos es mayor, debido a que el primer suelo retiene menor cantidad de agua que el segundo (CONADI, 2017).

2.2.1.2 Estructura

La estructura no es un parámetro estable, puede variar en función del: clima, manejo del suelo, los procesos edáficos, contenido de materia orgánica, etc. Un suelo con una buena estructura representa un volumen y distribución de poros adecuado; además, garantiza el óptimo aprovechamiento de nutrientes, la circulación del agua (entrada y salida), almacenamiento y redistribución entre los horizontes. También define la naturaleza del sistema poroso del suelo y colabora en mantener las partículas minerales (limo) fuera de los poros. El agua es el componente que afecta la estructura del suelo con mayor importancia debido a su

solución y precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas (Quiroga et al., 2018).

2.2.1.3 Densidad

Villalobos (2015) menciona que la densidad es un parámetro que varía de acuerdo con el manejo del suelo, por lo que su calidad física contribuye a determinar un ambiente adecuado para el enraizamiento de los cultivos y el almacenamiento óptimo del agua que requiere la planta para su normal crecimiento. En el suelo se consideran dos tipos de densidad: densidad aparente y densidad real.

2.2.1.3.1 Densidad aparente (D_a)

Se define como la masa del suelo seco por unidad de volumen; para determinarla, se divide el peso de suelo seco por el volumen del suelo y se expresa en g cm^{-3} . Es una propiedad importante para el manejo del suelo ya que refleja la facilidad de circulación del agua, aire y la compactación. La densidad aparente con respecto al volumen de poros varía de acuerdo a los cambios que se produzcan en el suelo; la labranza ocasiona compactación y disminuye el volumen de poros, cuando disminuye la materia orgánica, incrementa la densidad aparente del suelo y esto se asocia a la reducción de poros gruesos (Calvache, 2012).

2.2.1.3.2 Densidad Real (D_r)

No se considera el espacio poroso, sino que se relaciona la masa total del suelo seco con el volumen de la fase sólida. Los valores de la densidad real en todos los suelos son constantes y oscilan entre 2,5 a 2,6 g cm^{-3} dependiendo de su naturaleza mineralógica (Assan y Gorosito, 2018).

2.2.1.4 Porosidad

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general, el volumen del suelo está constituido por 50 % materiales sólidos (45 % minerales y 5 % materia orgánica) y el 50 % restante de espacio poroso. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y microporos, donde nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macro poros no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las

raíces. Los microporos retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas (Novillo et al., 2018).

2.2.1.5 Profundidad efectiva

CONADI (2014) menciona que la profundidad del suelo es aquella zona en la que las raíces de las plantas pueden penetrar sin mayores obstáculos, específicamente en relación con la obtención de agua y nutrientes. Por otra parte, Calvache (2012) señala que la profundidad es un factor importante, debido a que determina la cantidad de agua que puede retener el suelo. Por lo cual, si el suelo es profundo, la capacidad de retención es mayor, al igual que el espacio de exploración para las raíces, que dispondrán de adecuados niveles de humedad, aireación, temperaturas y nutrientes; factores que son fundamentales para un buen desarrollo de la planta. (Callejas et al., 2014)

2.3 Contenido de agua en el suelo

Es un dato importante para el cálculo de los aportes de riego en el suelo por lo que la FAO (2015) señala que tratar de mejorar el contenido de humedad en el suelo es fundamental para la producción de alimentos, debido a que una disminución de la capacidad del suelo para receptor, retener, liberar y trasladar agua reduce su productividad. El suelo debe almacenar la mayor cantidad de agua posible para que las plantas la puedan utilizar debido a que los escasos rendimientos de los cultivos en su mayoría se deben a la falta de la capacidad de los suelos para retener agua (Ferreira y Selles, 2013). Por ello, el contenido de agua del suelo es una de las más importantes variables hidrológicas directamente observables que puede llegar a cumplir con la función de ofrecer un balance en el uso sostenible del recurso hídrico para la agricultura.

2.3.1 Formas de expresar en contenido de agua en el suelo

El contenido de agua del suelo se puede expresar en tres formas: en unidades de masa, unidades de volumen; y, unidades lineales.

2.3.1.1 Contenido de humedad en unidades de masa (θ_m)

Es el método de referencia más utilizado que mide directamente el agua en el suelo, se establece como la relación entre la masa de agua y la masa del suelo seco. Para su determinación se extrae una muestra de suelo en campo y se coloca en un recipiente hermético, para que no se pierda la humedad inmediatamente se pesa y se lleva a una estufa a 105 °C

durante un periodo de 24 horas hasta que la muestra tenga un peso contante (Assan y Gorosito, 2018). Para su determinación se utiliza la siguiente fórmula:

$$\theta m = \frac{(Mw)}{(Ms)} * 100$$

Donde:

θm = Contenido de humedad en términos de masa (%)

Mw = Masa de agua (g)

Ms = Masa de solidos de suelo (g)

2.3.1.2 Contenido de humedad en unidades de volumen (θv)

El contenido de humedad en términos de volumen (θv) es la relación entre el volumen de agua (Vw) y el volumen total del suelo (Vs) (Gallegos, 2016).

$$\theta v = \frac{(Vw)}{(Vts)} * 100$$

Donde:

θv = Contenido de humedad en términos de volumen (%)

Vw = Volumen de agua (cm³)

Vt = Volumen total de suelo (cm³)

También se obtiene el contenido de humedad en unidades de volumen a partir del producto de la densidad aparente del suelo (Da) y el contenido de humedad en unidades gravimétricas (θm). Se emplea la siguiente ecuación:

$$\theta v = \frac{(Da)}{(Dw)} * \theta m$$

Donde:

θv = Contenido de humedad en términos de volumen (%)

Da = Densidad aparente del suelo (g cm⁻³)

$D_w =$ Densidad del agua (g cm^{-3})

$\theta_m =$ Contenido de humedad en unidades de masa (%)

2.3.1.3 Contenido de humedad en términos de lámina (mm)

Silva et al. (2015) menciona que las entradas y salidas de agua del suelo en un balance hídrico se expresan en términos de altura de agua por lo que es conveniente expresar el contenido de agua en el suelo en términos de altura o columna (h). Assan y Gorosito (2018) también indican que es otra forma de conocer el contenido de agua en el suelo por no decir la más habitual, se expresa a una determinada altura en milímetros (mm) y se define como el volumen de agua (θv) que tiene el suelo por una profundidad determinada (D).

$$Lamm = \theta v * D$$

Donde:

Lamm = Lamina de riego (mm)

$\theta v =$ Contenido de humedad en términos de volumen (%)

D = Profundidad del suelo (mm)

2.4 Energía del agua en el suelo

Lambert et al. (2016) menciona que como en todo sistema natural, el movimiento de un líquido como el agua depende de gradientes de energía que contribuyen a la predicción de su movimiento en el suelo, considerado como potencial energético del agua.

Para el riego no solo es importante saber el contenido de humedad sino también es indispensable conocer la energía que posee el agua en el suelo para poder determinar si se encuentra o no disponible para la planta. Los diferentes estados energéticos regulan el movimiento de agua en el suelo hacía las plantas, atmosfera y otras zonas del suelo. El agua en el suelo, es retenida por varias fuerzas que son: atracción gravitacional de la tierra, presencia de solutos disueltos, fenómenos de la superficie (tensión superficial) en interface solido - liquido (Angella et al., 2016).

2.4.1 Potencial del agua en el suelo (φ_t)

Llamado también potencial hídrico total del suelo que es la cantidad total de trabajo por unidad de masa de agua. Su estimación describe el flujo de agua o cuanto trabajo debe realizar una planta para extraer agua del suelo desde un punto de alto potencial (energía) hasta un punto de potencial total más bajo. Los componentes del potencial total del agua son: gravitacional, matriciales, osmóticas; y, de presión, los mismos que se detallan a continuación (Lambert et al., 2016).

$$\varphi_t = \varphi_g + \varphi_m + \varphi_o + \varphi_p$$

Donde:

φ_t = Potencial total

φ_g = Potencial gravitacional

φ_m = Potencial mátrico

φ_o = Potencial Osmótico

φ_p = *Potencial de presión*

2.4.1.1 Potencial gravitacional (φ_g)

Kirkhan (2014) citado por Aguinsaca (2020) indica que la energía gravitacional, es la energía potencial asociada con la posición vertical, traslada una cantidad de agua respecto a un nivel o altura de referencia, que varía de acuerdo con su necesidad, pudiendo ser positivo o negativo dependiendo si se encuentra sobre o bajo este nivel. Silva et al. (2015) también mencionan, que es el trabajo que realiza una cantidad infinitesimal de agua con respecto a un nivel de referencia, puede ser negativo o positivo si esta sobre o bajo del nivel.

2.4.1.2 Potencial matricial (φ_m)

Mendoza (2013) señala que es la relación entre las fuerzas de atracción del agua a la matriz del suelo y las fuerzas de atracción entre moléculas de agua. En función del gradiente de potencial, el agua se mueve de zonas húmedas (potencial alto o menos negativo) a zonas secas (potencial bajo o más negativo). El potencial matricial es negativo en la zona no saturada y es nulo en la zona saturada o bajo el nivel de freático.

2.4.1.3 Potencial osmótico (ϕ_o)

Denominado también potencial de solutos, debido a que la presencia de solutos reduce la energía libre del agua; su valor es negativo, y se encuentra siempre presente en las células, tiene más importancia cuando está separada por una membrana semipermeable. En el suelo se mide en respuesta al potencial hidráulico, es decir la suma del potencial mátrico y el gravitacional debido a que no hay membranas semipermeables (Silva et al., 2015).

2.4.1.4 Potencial de presión (ϕ_p)

Aparece en suelos saturados y se lo compara con la presión atmosférica (en una superficie de agua libre), su valor es positivo y se produce cuando se está ejerciendo una presión sobre el suelo. En cambio, su valor es cero cuando está sometido a presión atmosférica, en suelos agrícolas al no existir fuerzas sobre ellos el ϕ_p toma valores de cero (Yugueros, 2017).

2.5 Curva de retención de humedad del suelo

Silva et al. (2015) señalan que la curva característica de un suelo es aquella que se obtiene de graficar el contenido de agua del suelo (eje de las Y) versus la tensión o potencial mátrico (eje de las X), cada suelo tiene su propia curva y varía de acuerdo a la textura y estructura. Para la obtención de esta curva se somete el suelo a presiones entre 0,1 a 15 bares en una olla o plato de presión; cada vez que disminuye el contenido del agua del suelo, aumenta exponencialmente el trabajo necesario para extraer una cantidad adicional de agua.

2.5.1 Puntos importantes de la curva de retención de humedad

A continuación, se describen los puntos más importantes de la curva característica de humedad del suelo, y en la Tabla 2 se observan los mismos en unidades de pF y en atmósferas.

2.5.1.1 Saturación

Es el punto máximo de contenido de agua en el suelo, debido a que el agua se encuentra ocupando los macros y micro poros del suelo; en este estado de contenido de agua, las plantas tienden a ahogarse ya que no existe oxígeno. Luego de una lluvia o riego abundante, los poros del suelo se llenan y hay ausencia de aire, cualquier cantidad adicional de agua se escurrirá, encharcará o eliminará hacia las capas más profundas por la gravedad, esto indica que la saturación es el contenido de humedad total en el suelo (Cadena, 2017).

2.5.1.2 Capacidad de campo

Es el contenido de agua que se encuentra presente en el suelo luego de drenarse libremente durante 1 a 3 días posteriores a una lluvia o riego intenso; puede variar entre 0,1 bar para suelos arenosos a 0,3 bar para arcillosos. En términos globales esta fracción ocupa el 50 % del espacio poroso y está en función de la textura y estructura del mismo (Quirola et al., 2018). De igual forma, Andrade et al. (2015) indican que la capacidad de campo es el contenido de agua que puede retener el suelo una vez saturado o humedecido, después de haber drenado libremente evitando pérdidas por evapotranspiración hasta que el potencial hídrico del suelo se estabilice después de la lluvia o riego (entre 24 a 48 horas).

2.5.1.3 Punto de marchitez permanente

El punto de marchitez permanente se alcanza cuando el suelo se deseca a un nivel tal que el agua que queda está retenida con una fuerza de succión mayor que la de absorción de las raíces de las plantas. Las plantas por lo tanto no pueden absorber el agua del suelo y experimentan un marchitamiento irreversible. Esta fracción corresponde a la suma del agua capilar no absorbible y el agua higroscópica (Pachés y María, 2019).

Tabla 2. Valores de pF y su equivalente en atmósferas

pF	Atm	Clases de agua
4,4	± 28,8	Agua higroscópica
4,2	15,0	Punto de marchitez permanente (PMP)
2,52	0,33	Capacidad de Campo (CC)
2,0	0,10	Capacidad de campo (CC)
0,0	0,001	Saturación

Fuente: Valarezo et al. (1998)

2.5.1.4 Umbral de Riego (UR)

Denominada también agua fácilmente aprovechable (AFA) que la planta puede extraer sin restricciones, constituye una cantidad de agua fácilmente disponible, por lo tanto, al UR se lo considera como la mitad de la diferencia de la capacidad de campo (CC) y el punto de

marchitez permanente (PMP). Se expresa como el porcentaje de la humedad aprovechable total que puede ser usada por el cultivo sin que su producción disminuya (Ojeda et al., 2018).

2.5.1.5 Agua aprovechable

Es la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), se considera como agua utilizable o potencialmente extraíble por las plantas en la zona de crecimiento radical, es decir, de toda el agua que se encuentra presente en el suelo, solo esta fracción puede ser utilizada por las plantas. Conocer este parámetro, permite predecir cuál será el máximo rendimiento al que puede aspirar un cultivo establecido en un determinado terreno (Quirola et al., 2018).

2.5.1.6 Capacidad de aireación

Los poros del suelo que están ocupados por aire a capacidad de campo, constituyen la porosidad de aireación, que es importante para la difusión del oxígeno hacia las raíces. Si la porosidad de aireación es mayor a 10 – 15 % es satisfactoria para el crecimiento de las plantas (Valarezo et al., 1998).

2.6 Riegos

Los cultivos necesitan absorber la cantidad de agua indispensable del suelo para su óptimo crecimiento y desarrollo, por ello el riego consiste en aportar el agua necesaria al cultivo para cubrir las necesidades bajo condiciones particulares. Existen diferentes métodos de riego y cada uno se ajusta a la situación y necesidad de la planta y se diferencian por la eficiencia de aplicación del agua (Demin, 2014).

Martínez (2014) afirma que el riego es un aporte artificial de agua a las plantas con el fin de suministrar la humedad óptima para lograr el desarrollo adecuado del cultivo.

Según Chávez (1978) citado por Gallegos (2016) señala que la reposición de agua al suelo puede realizarse de diferente manera, según la técnica de riego utilizada, distinguiéndose básicamente los siguientes métodos de riego; superficial o gravitacional, subsuperficial, y riego presurizado. La clasificación más común de los métodos de riego se establece de acuerdo con la forma como el agua es esparcida o distribuida sobre el suelo, dependiendo de las características topográficas, los tipos de cultivo, la disponibilidad del recurso hídrico, los costos y la posibilidad de acceder a tecnologías con altos requerimientos de inversión.

2.6.1 Riego gravitacional

El riego superficial por gravedad se caracteriza por distribuir el agua sobre la superficie del suelo debido a la acción de la fuerza gravitacional. Según como la superficie del suelo sea cubierta por el agua, surgen diferentes métodos del riego por superficie entre los principales; surcos, melgas, pozas, riego por desbordamientos entre otros. Las condiciones topográficas del terreno introducen variantes en el método de riego por superficie. Un terreno plano, de suave pendiente, permite un trazado de surcos y melgas rectas; mientras que un terreno con fuerte pendiente requiere el trazado de surcos y melgas en contorno (Cadena, 2012).

2.6.2 Riego subsuperficial

Chávez (1978) citado por Gallegos (2016) señalan que en esta modalidad de riego el agua penetra desde la superficie y se repone a intervalos de tiempo, generalmente de varios días, toda vez que la lámina de agua consumida alcanza un espesor adecuado para su manejo eficiente. El sistema de riego subsuperficial se basa en aplicar el agua a la planta lo más cercano posible a su sistema radicular, consistiendo en canales de pipas de plástico y tecnología de emisión que entrega agua y nutrientes directamente al suelo y raíces a bajas presiones y caudales; normalmente se opera en frecuentes intervalos de duración variada para abordar a la agricultura múltiples objetivos y retos asociados con la gestión de humedad en la zona del cultivo. Los principales beneficios se ven reflejados en el rendimiento, calidad, flexibilidad, eficiencia en el uso del agua.

2.6.3 Riego por aspersión

Se aplica sobre grandes extensiones lanzando un gran volumen de agua equilibrada y uniforme simulando una lluvia. En un sistema de riego por aspersión, la intensidad de precipitación debe ser menor que la tasa de infiltración básica del suelo, de esta manera se logra que toda el agua que cae sobre la superficie del suelo se infiltre. Por la condición antes indicada se evita el encharcamiento superficial, los cuales traerían como consecuencia aplicaciones no uniformes del agua y serios problemas de erosión (Solórzano et al., 2015).

2.6.4 Riego por microaspersión

Esta es una variante del método por aspersión. En este tipo de riego los microaspersores rocían gotas de agua más pequeñas a presión, con menos flujo de agua y radio de

humedecimiento. Es adecuado para terrenos irregulares, inclinados con alta uniformidad y presenta como desventaja que los fuertes vientos pueden afectar a la uniformidad del riego (Demin, 2014).

2.6.5. Riego por goteo

El riego por goteo es un sistema presurizado que conduce y distribuye el agua por conductos (red de tuberías) que requieren presión y aplica el agua a los cultivos a través de emisores que entregan pequeños volúmenes de agua de manera periódica en forma de gota por medio de emisores. Desde el punto de vista agronómico se lo denomina riego localizado o de alta frecuencia ya que permite el humedecimiento de un sector de volumen de suelo suficiente para el desarrollo del cultivo (Liotta et al., 2015).

2.6.5.1. Ventajas

Según Tarchitzky (2002) citado por Franco (2018) las ventajas de riego por goteo se mencionan a continuación:

- Control de malezas
- Ahorro de agua
- Disminución de los daños a la estructura del suelo
- Aumento la calidad de las cosechas
- Ahorro de mano de obra
- Ahorra en pesticidas y control de ciertas enfermedades en el cultivo
- Uso óptimo y ahorro en el fertilizante
- Hay que vigilar periódicamente el funcionamiento del cabezal y de los emisores, con el fin de prevenir las obstrucciones.

2.6.5.2 Desventajas

Según Pizarro (1990) las limitaciones del riego por goteo en el suelo son las siguientes:

- Inversión inicial elevada
- Tratamiento y filtración del agua
- Se necesita personal calificado

- Es preciso hacer un adecuado control de dosis de agua, fertilizantes, pesticidas y productos aplicados al agua de riego
- Si se proyecta o se instala mal, puede ocasionar la pérdida de la cosecha por falta de agua y nutrientes
- Acumulación de sales en el suelo
- Daños mecánicos que se ocasionan al sistema de goteo ya sea por el hombre, o por los animales

2.6.5.3. Componentes de un sistema de riego por goteo

Los componentes básicos de un sistema de riego por goteo son los siguientes:

2.6.5.3.1. Fuente de abastecimiento agua

El abastecimiento para el sistema puede provenir de una fuente subterránea a través de una perforación o una fuente de tipo superficial, como de una quebrada, río o un canal teniendo en cuenta, la ubicación, la calidad del agua y el caudal disponible.

En ciertas zonas, el agua se almacena en reservorios para abastecer de manera permanente a las personas que son beneficiadas con el riego. En alguno de los casos es a través de un sistema de impulsión que posibilita el aprovechamiento de las aguas subterráneas (Blanca et al., 2014).

2.6.5.3.2. Equipo de bombeo

El equipo de bombeo va conectado a la toma de agua y se encarga de suministrar el caudal y presión adecuada para el funcionamiento del sistema, está comprendido por: la bomba hidráulica, la tubería de aspiración de agua desde la fuente (pozo) y la tubería de impulsión a la salida de la bomba. Se debe tener en cuenta la presión requerida para vencer el desnivel entre la fuente de agua y el terreno, en su mayoría las más utilizadas son las de tipo centrífugas impulsadas por energía eléctrica (Maza, 2020).

2.6.5.3.3. Cabezal de control

Liotta et al. (2015) mencionan que el cabezal de riego se ubica aguas arriba y es el conjunto de elementos que sirven para proporcionar presión, caudal, filtrar el agua, inyectar fertilizantes, medir presiones, volúmenes y controlar de forma manual o sistemática el

funcionamiento del sistema de riego; por otra parte, Martínez (2014) indica que el cabezal o control de riego se lo coloca en la cabecera de las superficies de riego, es el elemento central del sistema, está constituido por: equipo de bombeo, válvulas, instrumentos de programación, dispositivos de filtrado o el equipo de fertilización, accesorios, equipos de presión (manómetros) entre otros.

2.6.5.3.4. Sistema de filtrado

Es el componente más importante y principal del cabezal de riego, tiene la finalidad de no permitir que las impurezas ingresen al sistema o elementos que lleva el agua en suspensión, y con ello ocasionar obstrucciones en cualquier parte de la red de riego, especialmente en los emisores, lo que provoca una mala distribución del agua y con ello una baja productividad de los cultivos (Castro, 2016). En esa misma tendencia, Gilbert et al., (1981) citado por Keshtgar (2012) señala que el agua suministrada contiene partículas en suspensión, sales y fertilizantes disueltos que crean problemas graves que requieren esfuerzos tediosos y mano de obra calificada para resolverlos. El uso de inyección de ácido y/o el reemplazo de nuevos emisores son las principales soluciones comunes para el serio problema de obstrucciones, que requieren mucho tiempo e imponen un enorme costo de funcionamiento para el sistema.

La obturación de los emisores está directamente relacionada con la calidad del agua. Las partículas en suspensión, la composición química y la población microbiológica que se pueden encontrar, determinan el tipo de tratamiento que puede ser necesario para la prevención de estas obturaciones (Nakayama et al., 2007 citados por Duran, 2008).

En los sistemas de riegos por goteo se pueden emplear tres tipos de filtros, según su función de filtrado: a) filtros de hidrociclón, empleados para separar las partículas más pesadas que lleva el agua en suspensión, tales como la arena presente en el flujo, b) filtros de arena, para retener las partículas de arcilla y materia orgánica; y, filtros de malla y de anillas (o disco), muy empleados sobre todo para flujos de agua procedente de pozos (Reinders et al., 2012).

Para Torres (2013) la pérdida de carga en los filtros, depende del medio filtrante, de la propia carcasa del filtro y del caudal. La pérdida de carga aumenta progresivamente con el tiempo a medida que el filtro se va colmatando. Una pérdida de carga excesiva indica que es necesario sustituir el filtro.

La determinación de la calidad del agua utilizada, un correcto diseño y manejo de los sistemas de riego son factores muy importantes para prevenir las obturaciones de los emisores y por tanto mantener una alta homogeneidad en la distribución del agua en la parcela.

2.6.5.3.5. Equipo de fertilización

El rendimiento de un cultivo está directamente relacionado con la cantidad de nutrimentos que los diversos tipos de suelo le aporten, o bien por la aplicación de abonos fertilizantes en las cantidades técnicamente recomendadas.

Se utiliza para inyectar de forma directa los fertilizantes al sistema, este tipo de fertilización es más conocida como fertirriego; el cual consiste en un tanque de dimensiones determinadas donde se disuelven los fertilizantes de tal manera que fluyan a través de las tuberías a las plantas del cultivo; sus componentes son: tanque de fertilizante, sistema Venturi; y bomba fertilizante (Fernández, 2010).

2.6.5.3.6. Manómetros

Los manómetros son dispositivos que miden la presión del agua, son muy útiles para detectar fallas en el funcionamiento del sistema. La obstrucción puede ocurrir con más frecuencia en los filtros, en los tanques de fertilización o en los emisores, por ello los manómetros se colocan de preferencia antes de los equipos de filtrado, con la finalidad de conocer la presión de entrada del cabezal antes de que los filtros produzcan pérdidas de carga. También se coloca otro filtro al final del cabezal el cual indicará la presión de salida, y que se habrá de considerar para el diseño del sistema (Castro, 2016).

2.6.5.3.7. Válvulas

Las tuberías necesitan de válvulas y accesorios por lo cual Waller y Yitayew (2016) citado por Aguinsaca (2020), menciona las más importantes y se describen a continuación:

- **Válvulas de aire:** Admiten liberar aire que se puede acumular en puntos altos, por lo cual es una buena práctica incluir estas válvulas. Se deberían ubicar a la salida de grupos de bombeo, en picos y zonas altas de conducción, a la salida de depósitos, en variación de pendientes y en pendientes prolongadas y uniformes.
- **Válvulas de mariposa:** Trabaja similar que el de compuerta, su operación es más fácil, consiste en un disco que gira alrededor de un eje por el diámetro de la tubería,

su utilización no siempre es buena debido a que el disco es un obstáculo para el paso del flujo ya que este puede acumular escombros.

- **Válvula de compuerta:** son válvulas de abertura y cierre que necesitan atención constante, se utilizan para el control de presión y descarga, poseen una compuerta o cuchilla accionada por un vástago para abrir, cerrar o regular el flujo de agua que pasa por la tubería.
- **Válvulas de control:** son válvulas de control disponibles para controlar problemas de descarga y presión, reducción y mantenimiento de presión. Se encuentran en las tuberías terciarias las cuales se encargan de regar las subunidades de riego.

2.6.5.3.8. Tuberías

La red de distribución está básicamente constituida por una tubería principal, secundarias, y laterales de distribución dotadas con sus respectivos emisores o goteros. Los materiales de los tubos más utilizados para el riego por goteo son el PVC y polietileno. Son rígidos debido a que el PVC es susceptible de deformaciones y deterioro por efecto de los agentes meteorológicos, las tuberías de este material se usan principalmente como principales enterrados (Castro, 2016).

2.6.5.3.9. Los emisores

Según Fernández (2010) los emisores son los elementos de la red que producen y controlan la salida de agua desde los laterales. Lo más usual es que los emisores estén situados a cierta distancia unos de otros, por lo que la salida del agua se produce de manera discreta a lo largo del lateral de riego formando los bulbos húmedos; sin embargo, el agua también puede aplicarse de forma continua creándose una banda humedecida en el suelo. IDE (2015) anota que los emisores deben responder a las condiciones particulares existentes en el campo, a saber: tipo de cultivo, tipo de suelo, requerimientos de riego del cultivo, calidad del agua, tiempo de operación, altura de presión, etc.

2.6.5.3.9.a Regulación de presión de los goteros

Los goteros de acuerdo a su regulación de presión se clasifican en:

Auto-compensados. - Denominados también con compensación de presión (PC), tienen la particularidad de mantener el mismo caudal, aunque varíe la presión. El flujo es turbulento y en su interior poseen una membrana de silicona (diafragma) que se deforma por la diferencia

de presión del agua antes y después de la misma, modificando el conducto de paso y manteniendo el caudal constante. Su uso es más frecuente en terrenos con desniveles significativos, donde se producen grandes diferencias de presión o cuando se emplean laterales de gran longitud y con un menor diámetro. En este tipo de emisores, el exponente de descarga x de la ecuación del emisor tiende a ser cero (Liota, 2015).

Como inconveniente tienen que las variaciones extremas de temperatura pueden afectar a la membrana flexible que poseen en su interior para regular su funcionamiento, por lo que al cabo de cierto tiempo pueden perder su propiedad autocompensante (Pizarro. 1990). De igual manera Reinders et al., (2012) señalan que la combinación de los componentes del emisor dificulta el mantenimiento de valores bajos de CV y que su costo es más alto.

No-compensados. - O sin compensación de presión (NPC), no tiene mecanismo de regulación de caudal y varía en función de la presión. Pueden funcionar con menor presión que los auto-compensados. Sin embargo, para no perder uniformidad de caudal ($\pm 10\%$), la longitud de los laterales debe ser menor. En este tipo de emisores el exponente de descarga x de la ecuación del emisor varía entre 0,2 a 0,8 (INEH, 2013).

Ortiz (2020) señala que, si se diseña con goteros no compensantes, se tiene que ser muy cuidadoso en el cálculo de las pérdidas de presión y de los valores máximos y mínimos calculados en el bloque de riego para que no se produzcan desviaciones de caudal superiores al valor máximo permitido.

Entre las principales ventajas de este tipo de gotero se señala las siguientes: costo relativamente bajo en comparación con los goteros compensadores de presión; la composición simple mejora la descarga uniforme entre emisores (valores de coeficiente de variación bajos); y, menos componentes y sin complicaciones disminuyen la vulnerabilidad a daños mecánicos.

Entre sus principales desventajas, se anota: la longitud lateral, por lo tanto, la descarga está influenciada por la topografía que influye directamente en la presión de funcionamiento; y, normalmente se utilizan diámetros de tubería más grandes a lo largo de pendientes más planas para limitar las pérdidas por fricción (Reinders et al., 2012).

2.6.5.3.9.b. Riesgo de obturación de los goteros

El peligro de obturación de los goteros, aparte de la calidad del agua, va a depender en gran medida de la velocidad del agua (interesa velocidades altas para evitar atascos) y del

tamaño del orificio de salida del gotero. Consecuentemente, los goteros según el tamaño de salida se clasifican en:

Goteros de tamaño pequeño. - Diámetro del orificio de salida menor a 0,7 mm; riesgo elevado de obstrucción.

Goteros de tamaño mediano. - Diámetro del orificio de salida comprendido entre 0,7 y 1,5 mm; riesgo medio de obstrucción.

Goteros de tamaño grande. - Diámetro del orificio de salida mayor de 15 mm; riesgo bajo de obstrucción (IDI, 2015).

2.6.5.3.9.c. Principales características de un gotero

Según Liota (2015) a continuación se describe las principales características de los goteros:

- **Caudal nominal.** - Es el caudal que suministra el gotero a la presión nominal. Oscila entre 2 y 4 l h⁻¹ en hortalizas, aunque puede llegar hasta valores de 16 l h⁻¹ en otros cultivos.

- **Presión nominal (Pn).** - Es la presión para la que se ha diseñado el emisor y que generalmente es de 10 m.c.a (metros de columna de agua). En goteros autocompensantes la Pn se sustituye por el rango de presiones de funcionamiento.

- **Régimen hidráulico.** - El más conveniente es el turbulento, ya que el laminar hace a los emisores más sensibles a las variaciones de presión, viscosidad y temperatura del agua.

2.6.5.3.9.d. Ecuación característica del emisor

La ecuación característica de un emisor es la siguiente:

$$q = K h^x$$

Dónde:

q = caudal del emisor (l h⁻¹)

K = coeficiente de descarga, característico de cada gotero (adimensional)

h = presión a la entrada del emisor (m.c.a.)

x = exponente de descarga característico de cada gotero (adimensional), que indica la sensibilidad de los emisores a la variación de presión (INEH, 2013).

2.6.5.3.9.e. Régimen hidráulico de los emisores

Como se observa en la Tabla 3 el exponente de descarga está en función del régimen hidráulico de cada emisor. Cuando el exponente es cercano a 0,5 las partículas se mueven en desorden, generalmente generados cuando un fluido sale por un emisor a gran velocidad. Un exponente que oscile entre 0,5 y 0,7 demuestra que el fluido tiende a ser turbulento, pero no en gran intensidad y su velocidad es menor al flujo turbulento. El flujo inestable o crítico expresa que el fluido se encuentra en un régimen de cambio entre el flujo laminar y el flujo turbulento. Finalmente, el flujo laminar se presenta generalmente en emisores de baja presión y se caracteriza por que la velocidad del fluido es baja y sus moléculas se mueven de manera ordenada en un mismo sentido (Keller y Karmeli, 1974).

Tabla 3. Régimen hidráulico de los emisores

Exponente x	Tipo de flujo
$X = 0,5$	Completamente turbulento
$0,5 < x < 0,7$	Parcialmente turbulento
$0,7 < x < 0,1$	Inestable o crítico
$X = 1,0$	Laminar

Fuente: Pizarro (1990)

2.6.5.3.9.f. Tipos de emisores y el exponente de descarga x

De la Tabla 4 se desprende que cuando el exponente de descarga x se acerca a 1 el flujo de salida del emisor es de régimen laminar; es característico en goteros, y emisores que trabajan con baja presión y la velocidad del flujo se reduce. Los emisores cuyos componentes de salida están compuestos por microtubos o son de tipo helicoidal, presentan un régimen de transición de turbulento a laminar y la velocidad del flujo es media. Los emisores que tienen componentes de salida tipo vortex permiten que la presión de trabajo se reduzca y estabilice, lo que provoca una descarga con una velocidad constante; mientras que los emisores autocompensados tienen un componente que regula su presión de trabajo y la mantiene constante, aunque existan

variaciones de presión en el sistema, por lo que su exponente de descarga es cero y no afecta a su ecuación característica (Pizarro, 1990).

Tabla 4. Tipos de emisores y el exponente de descarga

Emisor	X
Régimen laminar	1
Microtubos	1 – 0,75
Helicoidal	0,75 – 0,65
De régimen turbulento (orificios de laberinto)	0,5
Vortex	0,4
Autocompensante	0 – 0,4
Teórico perfectamente autocompensante	0

Fuente: Pizarro (1990)

2.6.5.3.9.g. Relación presión Vs caudal

La relación entre la altura de presión y la descarga es una característica muy importante de los emisores y es fundamental para el diseño, la gestión y la uniformidad del sistema.

La gráfica sobre la relación presión vs caudal de cada emisor (Figura 1) permite conocer su comportamiento frente a diferentes factores que puedan influir en su funcionamiento. Monge (2018) señala que en el régimen laminar la curva característica del emisor es prácticamente lineal entre la presión y el caudal, debido a que utilizan poca energía y la velocidad de salida del fluido es baja. Pizarro (1990) anota que, dada estas características del régimen laminar, duplicando la presión, duplica la descarga; por lo tanto, las variaciones en la altura de presión operativa dentro del sistema a menudo se mantienen dentro de $\pm 5 \%$ del promedio deseado.

En el régimen turbulento la curva es parabólica, el cambio en la descarga varía con la raíz cuadrada de la altura de presión, es decir $x = 0,5$ y la presión debe aumentarse cuatro veces para duplicar el flujo. Por lo tanto, a menudo se permite que la altura de presión en sistemas con emisores de flujo turbulento varíe en $< 10 \%$ del promedio deseado (INEH, 2013).

Los emisores autocompensados presentan como curva característica una línea horizontal (paralela al eje x) debido a que emiten un caudal constante, aunque existan variaciones de presión en el sistema; estos emisores regulan el flujo en varios grados, x puede ser menor que 0,5. Si la regulación de caudal es absoluta, $x = 0$ sin embargo, la regulación absoluta del flujo podría ser indeseable porque si alguna vez fuera necesario compensar un

diseño insuficiente o una disminución de descargas del emisor resultantes de una obstrucción lenta o el deterioro del emisor, el aumento de la presión no aumentaría el flujo (Ahmad y Ajas, 2013).

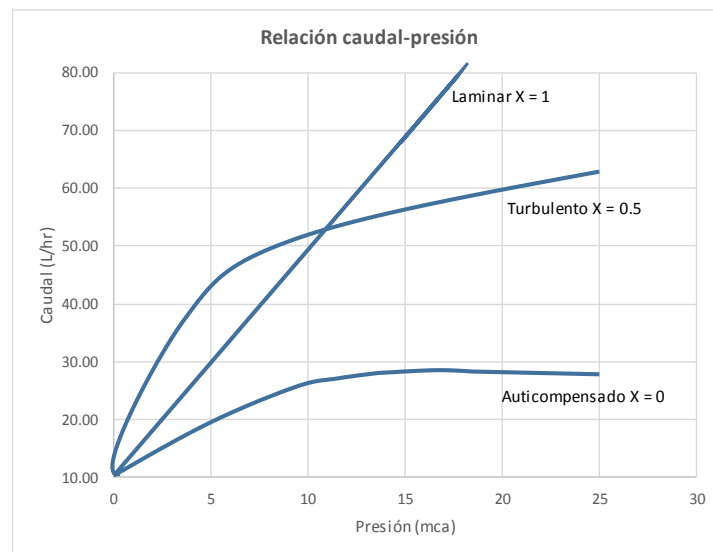


Figura 1. Relación caudal - presión

2.6.5.3.9.h. El coeficiente de variación por fabricación (CVF)

Uno de los parámetros más destacados a la hora de definir el comportamiento de los emisores es el coeficiente de variación de fabricación (Tabla 5), este término se utiliza para describir la variación de los caudales de una muestra de nuevos emisores sometidos a una presión establecida; por lo que se anota que no existen dos emisores perfectamente iguales, ya que los diferentes procesos de fabricación hacen que los caudales emitidos a igual presión sean distintos, por lo cual este coeficiente puede usarse para determinar la presión de la distribución del agua (Duran, 2008). Depende del diseño del emisor, de los materiales utilizados en su fabricación y del cuidado y tolerancias admitidas en el proceso de la misma, su valor varía de 0,02 a 0,20 y es uno de los factores que más afecta el funcionamiento de los emisores (Reinders et al., 2012).

Ahmad y Ajas (2013) señalan que en función del coeficiente de variación (CV) por fabricación, los emisores en general se pueden clasificar en dos categorías:

- Categoría A. Coeficiente de variación inferior a 0,05 (CV < 5%)
- Categoría B. Coeficiente de variación comprendido entre 0,05 y 0,1 (5% < CV < 10%)

Tabla 5. Coeficiente de variación por fabricación.

Rango	Clasificación
$CV \leq 0,04$	Excelente
$0,04 < CV \leq 0,07$	Medios
$0,07 < CV \leq 0,1$	Marginales
$0,1 < CV \leq 0,15$	Deficientes
$CV \geq 0,15$	Generalmente inaceptables

Fuente: Ahmad y Ajas (2013)

Las características de un buen emisor son: buena relación precio/calidad, caudal uniforme (poco sensible a las variaciones de presión), poco sensibles a obturaciones, alta uniformidad de fabricación, resistente a las condiciones de trabajo y fácil instalación (Liota, 2015).

2.7 Diseño de sistemas de riego por goteo

El diseño de un sistema de riego por goteo comprende dos partes; la primera se relaciona al diseño agronómico y la segunda al diseño hidráulico; por lo tanto, intervienen una serie de factores, tales como: clima, suelo, cultivo, calidad y cantidad de agua, disponibilidad de energía, presiones, medios económicos, formas de operar y mantener, etc (Keshtgar, 2012).

2.7.1 Diseño agronómico

El diseño agronómico considera entre otras características: el suelo, tipo de cultivo, el clima, la tecnología de riego, la densidad de siembra, el tiempo y frecuencias (días), etc (Solórzano et al., 2015).

Mendoza y Bermúdez (2015) también mencionan que el diseño agronómico contribuye a definir las láminas de riego a aplicar, tiempo, intervalos de riego, número de emisores por planta, espaciamiento entre goteros, capacidad requerida por el sistema y por último realizar ajustes en caso de no coincidir con la capacidad disponible. INTAGRI (2017) señala que el diseño agronómico de un sistema de riego por goteo, consiste en calcular los parámetros necesarios para que sea capaz de suministrar con eficiencia agua a las plantas y que la cantidad calculada sea la necesaria para el eficaz desarrollo del cultivo, así como para el manejo efectivo de sales. Un error en esta etapa de diseño impactará en el diseño hidráulico y tendrá

repercusiones económicas que pueden resultar en pérdidas en cuanto al rendimiento del cultivo por falta de agua en etapas críticas.

2.7.1.1 Necesidades hídricas de los cultivos

Las precipitaciones, y en concreto su fracción efectiva, aportan parte del agua que los cultivos necesitan para satisfacer sus necesidades de transpiración. El suelo actúa como reserva, almacenando parte del agua de las precipitaciones y devolviéndosela a los cultivos en momentos de déficit o escasez. En climas húmedos este mecanismo es suficiente para garantizar un crecimiento satisfactorio de los cultivos de secano. En climas áridos, o durante periodos secos prolongados, el riego es necesario para compensar el déficit de evapotranspiración producido por unas precipitaciones erráticas o insuficientes. El uso consuntivo del agua de riego se define como el volumen de agua necesario para compensar el déficit entre la evapotranspiración potencial y la precipitación efectiva durante la época de crecimiento del cultivo, por un lado, y los cambios en el contenido de humedad del suelo por otro. Esto varía considerablemente con las condiciones climáticas, las estaciones, los cultivos y el tipo de suelo (Goyal y Aladakatti, 2018).

2.7.1.1.1 Evapotranspiración del cultivo (ETc)

La evapotranspiración del cultivo hace referencia al agua que se pierde por medio del proceso de evapotranspiración; esta varía en función del clima, las características del cultivo, las prácticas de manejo y el medio de desarrollo, por lo tanto, el conocimiento preciso de la ETc es una herramienta fundamental que contribuye con una adecuada gestión de los recursos hídricos y con el mejoramiento de la productividad de los cultivos (Zhang et al., 2013).

2.7.1.1.1.a. Evapotranspiración de referencia (ETo)

Es la cantidad de agua, expresada en milímetros que es evaporada al aire durante un período especificado, a partir de una superficie de referencia que no tiene restricciones de agua, su área es un cultivo hipotético con características específicas, en el cual los únicos factores que afectan a la ETo son los climáticos. Por lo tanto, es un parámetro climático que se puede estimar a partir del cálculo de datos meteorológicos. La ETo expresa el poder de evaporación de la atmósfera en un lugar y épocas del año específicos sin considerar los factores de suelo ni las características del cultivo; además, es el dato de partida para diseñar los sistemas de riego para la optimización del agua para riego (Corley, 2009).

Se determina por medio de lisímetros y a partir de datos meteorológicos climáticos, los mismos que se pueden aplicar a través de los métodos: Penman Monthein, Blaney – Criddle, Hargreaves, Thornthwaite, entre otros.

2.7.1.1.1.b. Coeficiente del cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo (K_c) principalmente se lo utiliza para la planificación del riego y para los estudios hidrológicos de balance hídrico. También desempeña un papel esencial en diversas prácticas agrícolas y ha sido ampliamente utilizado para estimar la evapotranspiración del cultivo en la programación de la irrigación (Shirbeny et al., 2014). El K_c cumple la función de transformar la evapotranspiración del cultivo de referencia a evapotranspiración de cualquier cultivo en estudio, considerando la fase fenológica del mismo (Basso et al., 2016).

En base a la temporada de crecimiento del cultivo Memon y Jamsa (2018) consideran las siguientes fases de desarrollo:

- **Fase inicial:** desde la plantación hasta la germinación, alcanza un 10 % de cobertura del suelo.
- **Fase de desarrollo del cultivo:** va desde el 10 % hasta el 80 % de cobertura vegetal del suelo
- **Fase de mitad de periodo:** está comprendida desde el 80% hasta comienzos de maduración. En esta etapa el cultivo utiliza mayor cantidad de agua y el K_c alcanza el valor máximo.
- **Fase final de periodo:** comprende desde el inicio de la madurez hasta la cosecha completa.

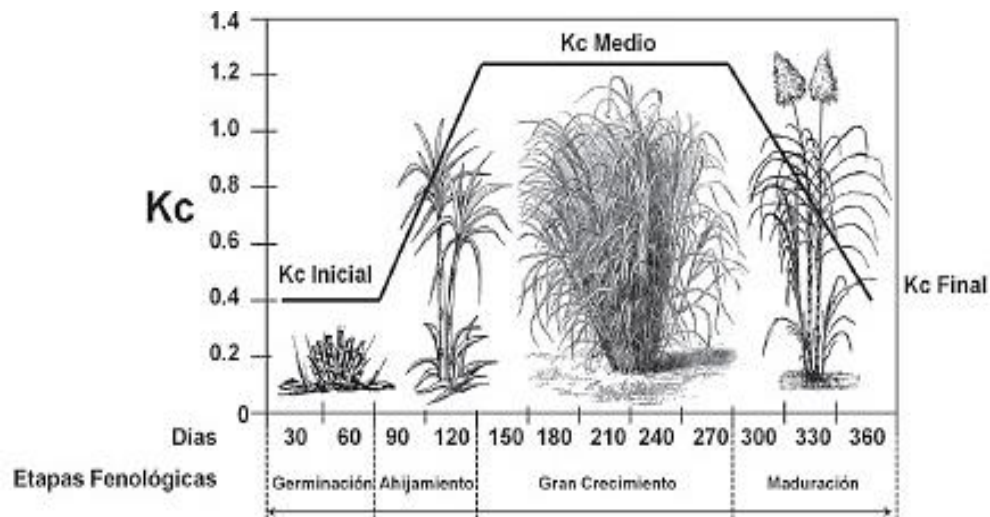


Figura 2. Curva generalizada del coeficiente (kc) del cultivo

Fuente: FAO 56

En la Figura 2 se observa los valores de Kc Vs las fases fenológicas del cultivo en todas sus etapas de desarrollo.

2.7.1.1.2. Precipitación efectiva P_e

Porta et al. (2014) señalan que la precipitación efectiva es la fracción de agua de lluvia que se infiltra en el suelo, es decir, la que se moverá y almacenará en el suelo, hará posible las reacciones químicas, los procesos edafogénicos, la vida en el suelo y de los cultivos. Por otra parte, Sarango (2019) menciona que, es un parámetro que recurre a métodos simplificados, que encierra dificultades específicas. Existen varias formas para determinar la precipitación efectiva, uno de ellos, es el propuesto por el Soil Conservation Service (USDA).

2.7.1.2. Necesidades de riego netas

Para el cálculo de las necesidades netas de un cultivo bajo riego por goteo Pizarro (1996) citado por Alfaro y Nomberto (2015) afirma, que se deben realizar correcciones a la evapotranspiración del cultivo máxima en el año. Dichas correcciones deben ser:

- Por localización, hace referencia al efecto que provoca la sombra sobre la superficie mojada del terreno.
- Por condiciones locales, toma en cuenta los aspectos climáticos de la zona y la naturaleza del cultivo.

- Por percolación y lavado, en riego por goteo, se puede originar una acumulación de sales en el bulbo húmedo, por lo que es necesario lavar; el sistema de riego por goteo a pesar de poseer una alta eficiencia también provoca percolación inevitable de acuerdo con las características del suelo.

2.7.1.3. *Porcentaje de suelo mojado*

Según Burneo (2018) no ha sido establecido un valor mínimo absoluto para el porcentaje de suelo mojado y tentativamente aconseja para cultivos ampliamente espaciados, porcentajes superiores al 20 % en zonas de alta precipitación y suelos de textura arcillosa, y entre 33 a 55 % en zonas de baja precipitación.

2.7.1.4. *Superficie mojada por un gotero*

Una vez escogido el caudal del gotero con el que se va a trabajar, para saber la superficie que moja el gotero, lo oportuno es hacer pruebas de campo, en las que se determinará el tiempo, el caudal, el radio del bulbo, y la profundidad del bulbo (Burneo, 2018).

2.7.1.5. *Laminas, tiempo y frecuencia de riego*

2.7.1.5.1. *Láminas de riego*

Cadena (2012) define a la lámina de riego como la cantidad de agua o carga de agua en unidades lineales o centímetros que se aplica al suelo para cumplir con los requerimientos de riego que contribuyan al normal desarrollo del cultivo.

2.7.1.5.2. *Lámina neta (Ln)*

Maldonado (2012) citado por Jiménez (2019) menciona que la lámina de agua aprovechable (LAA) es la cantidad de agua que puede almacenar el suelo a una profundidad determinada, es la diferencia del contenido de humedad a capacidad de campo (CC) y el contenido de humedad a punto de marchitez permanente (PMP). También menciona a la lámina de riego rápidamente aprovechable (LARA), la cual es la cantidad de agua que se debe aplicar en cada riego por unidad de superficie entre la capacidad de campo (CC) y el umbral de riego (UR) o factor de agotamiento.

2.7.1.5.3. *Lamina bruta (Lb)*

Es la lámina de agua total que necesita un cultivo considerando la eficiencia de aplicación que se encuentra definido en el método de riego. Recordemos que no es posible lograr un 100 % de eficiencia en la aplicación del agua y que no toda el agua que penetra es retenida en la zona radicular del cultivo, existen pérdidas inevitables, causadas por la no uniformidad en la aplicación del agua en el campo, por la percolación debajo de las raíces y por el escurrimiento superficial (Jiménez, 2019). De acuerdo al método de riego MINAGRI (2015) menciona valores referenciales que pueden ser utilizados para las eficiencias de aplicación.

En la Tabla 6 se presenta las eficiencias de aplicación del agua en el suelo de acuerdo al método de riego.

Tabla 6. Eficiencias de aplicación del agua según el método de riego

Método de riego	Eficiencia de riego (%)
Tendido	30
Surcos	45
Californiano	65
Aspersión	75
Microjet	85
Microaspersión	85
Goteo	90

Fuente: UDEC CHILE. Adaptado por MINAGRI (2015)

2.7.1.5.4. *Frecuencia de riego*

Cadena (2017) indica que la superficie de agua rápidamente disponible está relacionada con las mayores necesidades agrícolas, consecuentemente la frecuencia de riego se refiere al intervalo entre dos riegos consecutivos.

2.7.1.5.5. *Intensidad de precipitación*

En el caso de equipos de riego por goteo depende de las características propias como intensidad de precipitación real del equipo o el caudal aplicado por planta. La condición de riego localizado tiene varios efectos. Uno de ellos es que se modifica la evaporación y la transpiración del cultivo. La evaporación del suelo se reduce porque la superficie mojada es pequeña y se encuentra a la sombra del cultivo y la transpiración es ligeramente superior porque

el aire circundante a la planta se encuentra más caliente. El resultado es una reducción neta de la evapotranspiración del cultivo (ETc) de 10 a 15 % (Olguín Pringles, 2016).

2.7.1.5.6. *Tiempo de riego*

Es el tiempo que el sistema de riego debe estar funcionando para cubrir la demanda de agua de los cultivos y los factores complementarios de la evapotranspiración del cultivo.

2.7.2 Diseño Hidráulico

El diseño hidráulico permite calcular los diámetros y presiones que tendrá la línea de conducción y en base a estos se puede seleccionar la tubería. Permite trasladar una determinada cantidad de agua desde la fuente hasta el área destinada al riego, disminuyendo las pérdidas de agua y maximizando las eficiencias de conducción, distribución y aplicación en todo el sistema de riego, con el objeto de conseguir un reparto uniforme del agua de riego. Tiene por finalidad el cálculo de las dimensiones de la red de conducción y distribución y el óptimo trazado de las mismas. El diseño de las tuberías depende de factores físicos como área y topografía; de acuerdo con estos factores puede existir un diseño diferente (Fernández, 2010).

2.7.2.1 *Red hidráulica*

Waller y Yitayew (2016) señalan que las líneas principales transportan agua desde la fuente de abastecimiento a las zonas de riego que luego suministran a los laterales; estas líneas se encargan de llevar el agua a emisores de goteo o rociadores de aspersion o microaspersion, por tuberías de múltiples salidas, para ello su diseño hidráulico contribuye a la determinación de cambio de presión y variabilidad de aplicación a lo largo de la tubería del lateral. Las tuberías en riego por goteo son en general de PVC y PE. Las tuberías laterales y las secundarias se instalan en polietileno, en cambio la tubería principal puede ser de polietileno o de PVC dependiendo de su diámetro.

Fernández (2010) afirma que la red de conducción y distribución está formada por el conjunto de tuberías y automatismos que llevan el agua desde la fuente pasando por el cabezal de riego hasta los emisores (goteros).

- **Tubería principal:** Es la encargada de conducir el agua desde la fuente pasando por el cabezal y terminando en las tuberías secundarias de inicio.
- **Tubería secundaria:** Es la que abastece a cada unidad de riego según determinados criterios como son, superficie, suelo, cultivo, etc.

- **Tubería terciaria:** Es la encargada de distribuir el agua dentro de la subunidad de riego y es donde van acoplados los laterales.
- **Tubería lateral:** son las que están abastecidas por una tubería terciaria en la cual se encuentran colocados los emisores. Se disponen en paralelo a las líneas de cultivo.

2.7.2.2 Pérdidas de carga en tuberías

Según Pizarro (1990) las pérdidas de carga son la disminución de la presión en el interior de las tuberías causada por el movimiento del fluido, debido a la fricción de las partículas del mismo entre sí (viscosidad) y contra las paredes de la tubería (rugosidad). Existen dos clases de pérdidas de carga:

2.7.2.2.1 Pérdidas de carga lineal

Son pérdidas que se ocasionan a lo largo de toda la línea de conducción, existen numerosas ecuaciones que contribuyen a resolver las pérdidas de carga lineal en tuberías, siendo las más conocidas: Darcy-Weisbach, Manning, Hazen Williams, Scobey. Ortiz (2020) señala que la ecuación más utilizada es la de Hazen Williams ya que la fórmula a emplear es sencilla y su cálculo es simple debido a que el coeficiente de rugosidad “C” no es función de la velocidad ni del diámetro de la tubería.

2.7.2.2.2 Pérdidas singulares

Son pérdidas de energía que se producen por la instalación de accesorios y por fenómenos de turbulencia, se originan en puntos específicos de las tuberías como en: cambios de dirección, válvulas, manómetros, adaptadores, codos, derivaciones etc. Desde el punto de vista práctico, las pérdidas singulares se estiman del 15 al 20 % de las pérdidas longitudinales del sistema (Castillo, 2020).

2.7.2.3 Diseño de tuberías de riego

2.7.2.3.1. Diseño de la tubería lateral

Según IDI (2015) el diseño de la subunidad de riego (tuberías terciarias y laterales), está relacionada directamente, entre otros aspectos, con: las características físicas y químicas del suelo, tipo de cultivo, topografía del área de riego, etc. Consecuentemente, la regulación de presión del gotero (compensado o no compensado) definirá los elementos técnicos para

proponer la variación máxima admisible de presión que deberá haber en la subunidad de riego, y con ello determinar el porcentaje que le corresponde al lateral y a la terciaria.

Por otro lado, Chanatasig (2017) menciona que la conexión del gotero a la tubería porta goteros, produce una pérdida de carga que en general se expresa en forma de longitud equivalente de la tubería donde se va insertar el gotero. Turégano (2014) señala que el cálculo de la longitud equivalente se basa en la consideración de la obstrucción al flujo del agua en la tubería lateral que representa el propio emisor si se ha coextrusionado al momento de su fabricación al incorporarlo en la tubería o a su vez al momento de la inserción del emisor si es de tipo “pinchado”.

2.7.2.3.2. *Diseño de la tubería terciaria*

Demin (2014) señala que la conexión de cada lateral con la tubería terciaria se hace mediante la utilización de conectores o iniciales que quedan insertados entre ambas tuberías también se puede utilizar uniones, tees y reducciones para cada salida del lateral. Por otro lado, Maldonado (2014) menciona que la tubería terciaria es aquella que alimenta a las conducciones que llevan el agua directamente a las plantas, generalmente son de material de polietileno.

2.7.2.3.3. *Diseño de la tubería secundaria*

Ahmad y Ajas (2013) mencionan que dependerá de las dimensiones del terreno y del número de terciarias que funcionen al mismo momento. La variación de la presión en la tubería secundaria no debe superar el 20 % de la presión de operación del gotero y la velocidad del agua deberá estar comprendida en el rango establecido, el mismo que se explica posteriormente.

2.7.2.3.4. *Diseño de la tubería principal*

Considera no tener pérdidas superiores al 20 % de la presión de operación del gotero en la tubería principal. Se anula el coeficiente de Christiansen (CU) debido que no existen salidas múltiples. Igualmente, la velocidad del agua, deberá estar comprendida en el rango establecido para el diseño (Reinders et al., 2012).

2.7.2.4. *Coficiente de uniformidad de Chistiansen (CU)*

Un criterio de la calidad de riego es la uniformidad con la que se aplica el agua sobre la superficie de riego, es muy aplicado en los sistemas de riego; como regla general, valores de

CU > 86 % se consideran aceptables lo que significa que existe una buena distribución del agua en la zona de las raíces (González, 2018).

El coeficiente de Christiansen es la relación entre el promedio de las láminas almacenadas en el perfil del suelo a lo largo del campo regado y la desviación de dicho promedio, para un número específico de muestreos. Los valores para evaluar el coeficiente de uniformidad de un sistema se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Categorías para evaluar el coeficiente de uniformidad

Categoría	Cu
Excelente	> 94
Buena	85 – 94
Aceptable	80 – 85
Pobre	70 – 80
Inaceptable	< 70

Fuente: González (2018)

2.7.2.5. Eficiencia de distribución

Rain Bird Corporation (2010) afirma que una uniformidad de distribución (UD) inferior al 70 % es considerada deficiente, mientras que entre 70 y 90 % es buena; y, una superior al 90 % es excelente. En general, se podría decir que, si se tiene una uniformidad deficiente, quiere decir que el agua que se está aplicando no es de manera uniforme por lo que unas plantas podrían estar recibiendo más agua de lo designado, y otras pueden estar cayendo en un estrés hídrico debido a que no se está aplicando la cantidad necesaria de agua para que las plantas se puedan desarrollar con normalidad.

2.7.2.6. Eficiencia de aplicación

Es la fracción de agua que ha sido aplicada por el método de riego seleccionado y que está disponible para su uso en la planta, la cantidad de agua que no está disponible para la zona radicular de la planta puede haberse perdido por evaporación o desviación de las gotas de rociado por el viento, fugas de agua en el sistema de tuberías, escorrentía subterránea o percolación profunda (Zoratelli et al., 2019).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización del área de estudio

El proyecto de investigación se lo llevó a efecto en el Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba (CBFTZ), que se encuentra ubicado en el sector Zapotepamba de la parroquia Casanga del cantón Paltas de la provincia de Loja. Se puede acceder al sitio de estudio por vía terrestre de primer orden en un tiempo de 20 minutos desde la ciudad de Catacocha.

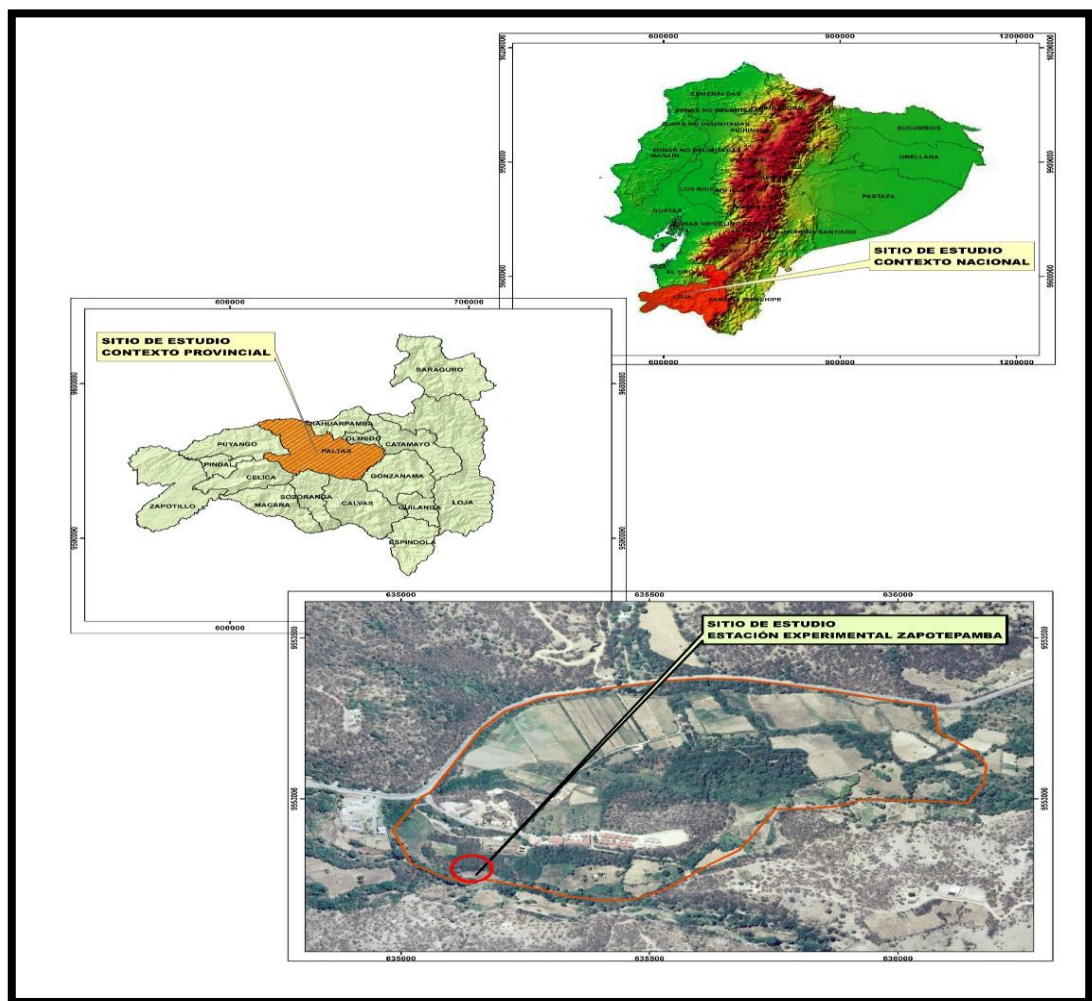


Figura 3. Ubicación geográfica del Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba Paltas

Fuente: Instituto Espacial Ecuatoriano

3.1.1 Ubicación geográfica

El Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba, geográficamente se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas planas:

Este: 635140.758 m

Norte: 9552756.052 m

Altitud: 935 m s.n.m.

3.1.2 Aspectos Biofísicos

3.1.2.1 Clasificación climática

Los registros de los parámetros del clima para el sector de Zapotepamba, indica que la temperatura media anual es de 23,5 °C y la precipitación promedia anual es de 662 mm. El régimen de temperatura del suelo corresponde a isohipertérmico (> 22 °C); en tanto que, el régimen de humedad del suelo es ústico, por presentar, en la mayoría de los años, más de 90 días consecutivos de agua aprovechable en el suelo en la temporada invernal (Valarezo et al., 2007).

3.1.2.2 Suelos

Los suelos del área de estudio son en general profundos a muy profundos, su textura varía dependiendo del tipo de depósito aluvio - coluvial desde franco arenoso a arcilloso; sin embargo, predomina la textura arcillosa y arcillo – limosa; la reacción es ligeramente alcalina por la presencia de carbonato de calcio libre, procedente tanto del material parental como de los procesos de pedogénesis que son los responsables de la formación de los diferentes horizontes de los suelos (Valarezo et al., 2007).

El área cuenta con una superficie de 195,6 ha de las cuales 40 ha son potencialmente regables, las mismas que están ubicados en la parte baja del predio; 150 ha se ubican en áreas de secano y formaciones naturales de bosque seco; y, las 5,6 ha restantes están destinadas para la infraestructura educativa y productiva.

3.1.2.3 Clasificación ecológica

Holdridge (1967) citado por Abad (2012) menciona que el Centro Binacional Técnica Zapotepamba se clasifica como Bs-T (Bosque seco-Tropical), con una altitud de 935 m s.n.m. y las especies vegetales que más predominan son: algarrobo (*Prosopis pallida*), balsa (*Ochroma*

lagopus), ceibo (*Ceiba trichistandra*), guadua (*Guadua angustifolia* Kunth), vainillo (*Cassia apectabilis*), zapote (*Capparis scabrida*), faique (*Acacia macracantha* L); entre otros.

3.2 Materiales y equipos de campo

Los materiales de campo utilizados para el presente estudio fueron los siguientes:

- Cartografía del sitio de estudio (IGM Ortofotos escala 1:5000)
- Cámara fotográfica, Estación Total/GPS diferencial
- Libreta de campo
- Tabla Munsell
- Barreno

3.2.1 Materiales de laboratorio

- Balanza de precisión
- Estufa
- Crisoles
- Equipo de Richards
- Cilindros koppecky de 100 cm³

3.2.2 Materiales de oficina

- Computadora con acceso a internet
- Material bibliográfico.
- Catálogos de materiales y equipos de riego
- Metodología para la implementación de sistemas de riego

3.3 Metodología

3.3.1 Reconocimiento del área y fuente de agua del sitio de estudio

En primer lugar, se realizó un recorrido por la zona de estudio con la finalidad de tener una idea clara y precisa de su extensión y límites. Posteriormente se seleccionó el área donde se va implementar el cultivo de café, el mismo que se ubica relativamente cerca de un reservorio que dotará de agua al cultivo.

3.3.2 Levantamiento topográfico

Se tomó en cuenta la asignación de coordenadas sobre la superficie terrestre que están en la Zona 17 Sur DATUM WGS 84 en el sistema de proyección Universal Transversal Mercator (UTM). Con ayuda del equipo GPS diferencial, se realizó la toma de puntos de partida y con la estación total se procedió hacer el levantamiento topográfico (Anexo 8. Figura 19), en el cual se consideró los siguientes aspectos: puntos en cada cambio de pendiente, reservorio de almacenamiento de agua, vías de acceso a la parcela, infraestructuras construidas y la parcela en la que se diseñó el sistema de riego por goteo. Una vez obtenidos todos los datos del levantamiento se los descargó a un Pc desde la estación total y procesó a través de un software donde se obtuvo la topografía con curvas de nivel permitiendo establecer los desniveles del terreno. Se complementó con el levantamiento de la línea de conducción (planimetría) a fin de obtener el perfil de la conducción (Anexo 12).

3.3.3 Metodología para el primer objetivo

Caracterizar las propiedades físicas e hidrofísicas del suelo relacionadas con el riego en el centro Binacional de Formación Técnica Zapotepamba.

En primer lugar, se realizó una calicata de 1,0 m de ancho, 1,0 de largo y 1,50 m de profundidad, en donde se estudió la morfología y las propiedades físicas del suelo. De los dos primeros horizontes, se tomaron muestras inalteradas por triplicado con cilindros koppecky de 100 cm³, para determinar el contenido de humedad a pF: 0; pF: 2,0 – 2,52; y, pF: 4,2 resultado que permitió conocer el agua aprovechable, la capacidad de aireación, el volumen de poros físicamente inservibles, la densidad aparente del suelo y con ello calcular la lámina de riego y evaluar físicamente el suelo. De igual manera, se tomaron muestras alteradas de los dos primeros horizontes del perfil para conocer principalmente la textura y fertilidad. Los dos tipos de muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos Agua y Bromatología de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja para sus respectivos análisis.

3.3.3.1 Constantes hidrofísicas

La metodología empleada para calcular los contenidos de humedad a diferentes tensiones se presenta a continuación:

3.3.3.1.1 Saturación (Sat). - En el laboratorio las muestras fueron saturadas hasta que la parte superior del cilindro se forme una película de agua, es decir la muestra se encuentren a (pF = 0) en términos de volumen es igual a la porosidad total.

3.3.3.1.2 Capacidad de Campo (CC). - Las muestras anteriormente saturadas fueron llevadas a la cámara de presión y sometidas a tensiones de 1/10 (pF = 2,00) y 1/3 atm (pF = 2,52) y se dejó trabajar el equipo por 24 horas. Luego se retiró y se pesó las muestras, las mismas que fueron ubicadas durante 24 horas en la estufa a 105 °C y posteriormente se pesaron. Con los datos obtenidos en laboratorio se aplicó la siguiente ecuación y se obtuvo la capacidad de campo en términos de porcentaje:

$$\% \text{ humedad } CC = \frac{\text{Peso suelo húmedo (g)} - \text{Peso suelo seco (g)}}{\text{Peso suelo seco (g)}} * 100$$

3.3.3.1.3 Punto de Marchitez Permanente (PMP). - Se tamizó la muestra seca que se obtuvo en la cámara de presión, se la colocó en los anillos de caucho y seguidamente se las ubicó sobre la placa de la olla de presión a 15 atm (pF = 4,2) durante un tiempo de 24 horas; posteriormente se pesó la muestra para determinar el PMP. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad } PMP = \frac{\text{Peso de suelo húmedo (g)} - \text{Peso suelo seco (g)}}{\text{Peso suelo seco (g)}} * 100$$

3.3.3.2 Curva de retención de humedad del suelo

La gráfica de la curva característica de humedad del suelo se la realizó con los resultados de los contenidos de humedad del suelo a diferentes tensiones; esto es: saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Para su elaboración se utilizó el promedio de los resultados de los dos primeros horizontes, debido a que sus texturas son muy similares. Se utilizó la hoja de software Excel para la elaboración de su gráfico.

3.3.3.3 Evaluación de las condiciones físicas del suelo

Con los resultados del agua aprovechable, la capacidad de aireación y el volumen de poros físicamente inerte, y con la ayuda del diagrama triangular (Anexo 3) se procedió a evaluar físicamente el suelo para la producción agropecuaria.

3.3.3.3.1 Agua aprovechable (AA)

El agua aprovechable se la determinó en base a la diferencia de los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$\% \theta_{AA} = \% \theta_{CC} - \% \theta_{PMP}$$

3.3.3.3.2 Capacidad de aireación (CA)

La capacidad de aireación del suelo se la obtuvo en base a la diferencia de los contenidos de humedad a saturación y capacidad de campo.

$$\% \theta_{CA} = \% \theta_{Saturación} - \% \theta_{CC}$$

3.3.3.3.3 Volumen de poros físicamente inerte (VPFI)

Se consideró el volumen de sólidos del suelo (V_s) y el porcentaje de poros inútil

$$\% \theta_{VFI} = 100 (V_s + \% \theta_{Vporos\ inútil})$$

3.3.4 Metodología para el segundo objetivo

Diseñar un sistema de riego por goteo en el Centro Binacional de Formación Técnica Zapotepmba.

3.3.4.1 Diseño agronómico.

Para el diseño agronómico se utilizó la siguiente información:

- a) Información de campo que se ve reflejada en los datos de laboratorio correspondientes al análisis del suelo utilizados para determinar la lámina edáfica que son: capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), densidad aparente (D_a) y textura.

- b) Recolección de información de las estaciones meteorológicas (Quilanga, Zapotillo y Yangana) para un periodo de 25 años (1990 - 2015): temperaturas y radiación solar variables utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia con el método de Hargreaves simplificado; también se utilizó, información de precipitaciones empleadas para el cálculo de la precipitación efectiva (Pe) por el método de U.S. National Weather Service.
- c) Datos agronómicos del cultivo del café como: variedad, densidad de siembra, profundidad media de la raíz, diámetro de copa, kc determinado a partir de las etapas fenológicas y altura del cultivo.
- d) El cultivo de café en el sitio de estudio se encuentra en la etapa inicial.
- e) Se adoptó la densidad de siembra: 1,25 entre plantas y 2,0 m entre calles.
- f) Catálogos de los goteros con características correspondientes a: presión, caudal, distanciamiento entre goteros y tipo (no compensado).

3.3.4.1.1 Necesidades hídricas del cultivo

Este parámetro permitió determinar la cantidad de agua que necesita el cultivo para compensar la demanda de evapotranspiración en épocas críticas, para lo cual, se utilizó información de: datos meteorológicos en formato Excel proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrografía (INAMHI), información del cultivo de café (*Coffea Arabica* L.). Una vez recopilada y procesada la información se procedió a determinar lo siguiente:

3.3.4.1.1.a. Evapotranspiración del cultivo (ET_c).

Se empleó el método propuesto por la FAO, que es el producto entre la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo (K_c). Se utilizó la siguiente ecuación:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo (mm mes⁻¹)

K_c = Coeficiente del cultivo (adimensional)

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm mes⁻¹)

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

Se procedió a buscar información de las estaciones meteorológicas de la provincia de Loja que dispongan de información completa en un rango mínimo de 25 años y que se encuentren cercanas al área de estudio. Al hacer el análisis de los datos de las estaciones circundantes al sitio, se pudo determinar que las mismas no disponían de información completa de las variables necesarias para determinar la ET_o del periodo de estudio con información continua y actualizada, lo cual es importante dada la variabilidad climática que se vive en la actualidad producto del cambio climático que hoy en día está viviendo el planeta.

En base a lo mencionado en el párrafo anterior, se buscó alternativas que permitan utilizar información de estaciones alejadas del área de estudio que contengan datos meteorológicos completos de las variables necesarias para determinar la ET_o en un periodo adecuado de 25 años. Para lo cual, se utilizó la metodología de correlación lineal de Pearson que ayudo a obtener el coeficiente de determinación (R^2) (Anexo 5) y en base a este parámetro se seleccionó las estaciones meteorológicas que presentaban el valor más cercano a uno, siendo las estaciones de: Quilanga, Zapotillo y Yangana las que obtuvieron los valores más altos de correlación en los parámetros que se utilizan para aplicar la metodología de Hargreaves simplificado de la FAO y la metodología propuesta por Fries et al. (2012) citado por Aguinsaca (2020) que usa el gradiente altitudinal.

Los meteoros utilizados para determinar la ET_o fueron: temperatura máxima, mínima, media (°C) y radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), con un periodo de 25 años (1990 - 2015).

Tabla 8. Estaciones meteorológicas utilizadas para determinar la ET_o.

Estación	Tipo	Código	Altitud (m)	Latitud	Longitud	Periodo
Quilanga	Meteorológica	MO241	1 819	669905.2	9554269	1995-2015
Zapotillo	Meteorológica	M0151	223	659527.8	9521547	1995-2015
Yangana	Meteorológica	M0147	1 835	696358.3	9599619	1995-2015

Fuente: INAMHI

En base a la información de la Tabla 8 se obtuvo un modelo matemático que permitió corregir la temperatura máxima y mínima de la zona de estudio a través de la metodología de Fries et al. (2012):

$$T_{det} = T_{mensual} + (r(Z_{det} - Z_{estación}))$$

Donde:

T_{det} = Temperatura determinada (°C)

$T_{mensual}$ = Temperatura mensual de cada estación (°C)

Z_{det} = Altitud determinada del sitio al que se va a elevar la temperatura (m s.n.m)

r = Pendiente o gradiente altitudinal resultado de la correlación

$Z_{estacion}$ = Altitud a la que se encuentra la estación (m s.n.m)

Una vez obtenidos los valores de temperatura (T_{det}) se aplicó la siguiente formula y se interpoló en el software ArcGis, obteniendo un raster que es multiplicado con un modelo digital de elevación (DEM), permitiendo obtener datos más precisos del lugar de estudio.

$$T_{xy} = T_{det} + (r(Z_{xy(DEM)} - Z_{det}))$$

Donde:

$T_{x,y}$ = Temperatura promedio mensual (°C)

T_{det} = Temperatura determinada (°C)

$Z_{xy(DEM)}$ = Modelo de información digital del sitio de estudio

r = Pendiente o gradiente altitudinal resultado de la correlación

$Z_{estacion}$ = Altitud a la que se encuentra la estación (m s.n.m)

Luego de haber obtenido los nuevos valores de temperatura máxima, mínima y media, se aplicó la fórmula de Hargreaves simplificada para obtener los valores de ET_o . Para el valor de la radiación solar se efectuó el mismo procedimiento que el de la temperatura. A continuación, se presenta la fórmula de Hargreaves simplificada:

$$ET_o = 0.0023(t_{med} + 17.78)R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración (mm día⁻¹)

t_{med} = Temperatura media (°C)

t_{max} = Temperatura máxima (°C)

t_{min} = Temperatura mínima (°C)

R_o = Radiación solar (mm día⁻¹)

Gráfico de la curva del coeficiente del cultivo (Kc)

Para graficar la curva y obtener los valores del kc del cultivo de café se procedió a:

- Se identificó las etapas fenológicas que van en función del tamaño y densidad del cultivo.
- Se determinó la fecha de siembra y los meses que tarda en desarrollarse el cultivo.
- Para graficar se colocó en el eje “x” el periodo de desarrollo y en el eje “y” el valor propuesto por la FAO para cultivos de café en suelo con cobertura.
- Al finalizar se obtuvo los valores del kc cada 15 días para cada mes.

3.3.4.1.1.b Precipitación efectiva (Pe)

Para determinar la Pe del área de estudio se trató de seleccionar las mismas estaciones meteorológicas utilizadas para la ET_o , pero al realizar el análisis de la información necesaria para el cálculo de la Pe en el mismo periodo de años (1990 – 2015) se comprobó que estas no contaban con información suficiente de precipitación para determinar la Pe, por lo cual se procedió a buscar estaciones meteorológicas circundantes al área de estudio, que presenten condiciones climáticas similares.

Las estaciones que rodean el área de estudio se muestra en la Tabla 9, cuyos valores de precipitaciones medias mensuales de los anuarios meteorológicos del INAMHI con un período de 25 años y con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), fueron analizadas para determinar la Pe.

Tabla 9. Estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo de la precipitación efectiva.

Estación	Tipo	Código	Altitud (m)	Latitud	Longitud	Periodo
Célica	Meteorológica	M0148	1 904	616393.3	9546220.8	1990-2015
Alamor	Meteorológica	M0435	1 250	607924.9	9555751.2	1990-2015
Chaguarpamba	Meteorológica	M0754	1 470	615095	9565569	1990-2015
Catacocha	Meteorológica	M0515	1 808	650478.1	9522745.1	1990-2015

Fuente: INAMHI

Una vez obtenida la información de las estaciones meteorológicas se consideró el método U.S. National Weather Service y USDA, que consiste en determinar el centro de gravedad e interpolar los valores medios de precipitación de estaciones que rodean al sitio de estudio mediante el algoritmo, distancia inversa ponderada (IDW) para cada mes. Este método se lo utilizó porque estima la precipitación en un punto incógnita con un promedio ponderado de las estaciones, dando valores más aproximados donde se va a realizar el diseño al área de estudio.

Martínez (2014) señala que para el diseño de sistemas de riego es importante conocer su valor como la parte de precipitación efectivamente almacenada y retenida por la zona radicular a profundidad aprovechable de la planta, este valor se lo multiplica por el factor de corrección de 0,75.

Método U.S. National Weather Service

Luego de haber elegido las estaciones, se empleó la siguiente formula por cada mes:

$$P = \frac{P_1 \left(\frac{1}{d_1}\right)^2 + P_2 \left(\frac{1}{d_2}\right)^2 + \dots + P_n \left(\frac{1}{d_n}\right)^2}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}}$$

Donde:

P = Precipitación media ponderada (mm)

$P_1, P_2 \dots P_n$ = Precipitaciones medias consideradas de las estaciones (mm)

$d_1, d_2 \dots d_n$ = Distancias de cada estación hacia el punto de estudio (m)

Cuantificación de la precipitación efectiva

Se multiplicó el promedio de las precipitaciones de cada mes por 0,75 factor de corrección propuesto por Servin et al. (2017). Se emplea la fórmula de la USDA para $P_{tot} < 250 \text{ mm}$

$$P_{ef} = P_{tot} \frac{(125 - 0.2P_{tot})}{125}$$

3.3.4.1.1.c Requerimientos de riego del cultivo del café

Es la cantidad de agua que debe aportarse a un cultivo para asegurar que recibe la totalidad de sus necesidades, para ello se aplicó la siguiente ecuación:

$$\text{Requerimientos de riego} = ET_c - P_e$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹)

P_e = Precipitación efectiva (mm mes⁻¹)

3.3.4.1.1.d Necesidades brutas (Nb)

Se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Nb = \frac{ET_c}{E_a}$$

Donde:

Nb = Necesidades brutas (mm día⁻¹)

ET_c = Evapotranspiración de cultivo (Kc)

E_a = Eficiencia de aplicación para el sistema de riego por goteo

3.3.4.1.1.e Caudal ficticio continuo

Se calculó aplicando la siguiente ecuación para todos los días del mes a partir de las necesidades brutas:

$$q_c = \frac{ET_c}{Eficiencia_{sistema} * 8,64}$$

Donde:

q_c = Caudal ficticio continuo ($l s^{-1}ha^{-1}$)

ET_c = Evapotranspiración del cultivo de máxima exigencia hídrica ($mm día^{-1}$)

3.3.4.1.2. Necesidades de riego

Según Pizarro (1990) citado por Alfaro y Nomberto (2015) las necesidades de riego fueron corregidas por:

- a) Por localización
- b) Por condiciones locales
- c) Necesidades netas de riego (NT)
- d) Necesidades totales

3.3.4.1. 2.a. Correcciones por localización

Primero se determinó la fracción del área sombreada de la planta con relación a la superficie que moja, posteriormente se multiplicó la proyección del diámetro de copa del árbol sobre el suelo por el marco de plantación. Se aplicó la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi Dm^2}{4(a * b)}$$

Donde:

A = Fracción del área sombreada de la planta (m^2)

Dm^2 = Diámetro de la copa del árbol (m)

a = Distancia entre plantas (m)

b = Distancia entre surcos (m)

La ET_c depende de la masa de follaje, superficie de hojas, volumen de copa, etc. y como estas variables son difíciles de cuantificar se las representa en función del % área sombreada, obteniendo las fórmulas siguientes:

Ecuacion de Aljibury Kl = 1,34 A

Ecuacion de Decroix Kl = 0,1 + A

Ecuacion de Hoare Kl = A + 0,5(1 - A)

Ecuacion de Keller Kl A + 0,15(1 - A)

Para obtener el coeficiente por localización Kl se calculó por los cuatro métodos y se trabajó con el promedio de los dos valores intermedios.

3.3.4.1.2.b. Correcciones por condiciones locales

Se consideró los efectos ocasionados por las condiciones climáticas del sitio sobre la evapotranspiración corregida, por lo cual se tiene dos variaciones que se las describe a continuación:

- **Variación climática (Kv):** se utiliza para corregir los valores de promedios mensuales o de los promedios de un periodo determinado utilizados para los cálculos de la ETo. Para riego localizado se estima valores entre 1,15 y 1,2 (Pizarro, 1990). Tomando el valor de Kv = 1,20 para este diseño de acuerdo las condiciones climatológicas cambiantes del ámbito de la zona de estudio.
- **Variación por advención (Ka):** está en función de la naturaleza del cultivo y del área a ser regada. Este dato se lo puede obtener del grafico ilustrado a continuación.

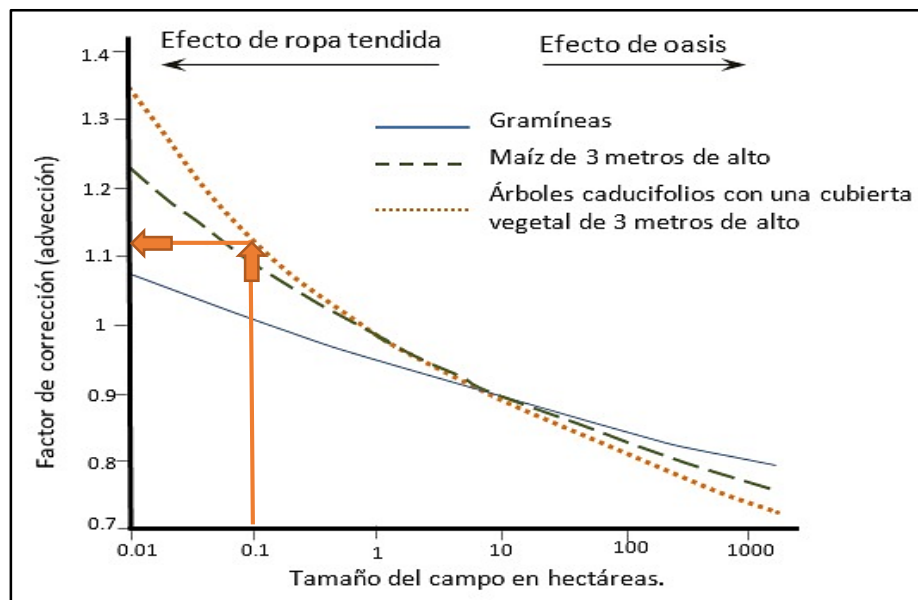


Figura 4. Coeficiente de advección de acuerdo con el área del terreno

Fuente: Alfaro y Nomberto (2015) adaptado por Aguinsaca (2020)

El cultivo de café se lo ubica en la curva de los caducifolios, es un arbusto, sus hojas se mantienen con vida a lo largo de todo el año, en estado silvestre las plantas pueden llegar a medir 10 m sin embargo en plantaciones puede llegar a 3 m de altura. Una vez obtenido los valores de corrección de la Figura 4 se multiplicó por la ET_c obteniendo el valor de la evapotranspiración corregida (ET_{rl}).

$$E_{trl} = ET_c \times K_l \times K_v \times K_a$$

3.3.4.1.2.c Necesidades netas de riego (N_n)

Se calcularon a partir de la evapotranspiración corregida por condiciones locales y variables climáticas (ET_{rl}) y se realizó un balance hídrico representado en la siguiente ecuación:

$$N_n = ET_{rl} - (P_e + G_w + \Delta w)$$

Donde:

ET_{rl} = Evapotranspiración corregida (mm día^{-1})

P_e = Precipitación efectiva, igual a 0 (mm)

G_w = Aporte capilar, igual a 0 (mm)

Δw = Variación en el almacenamiento de agua, valor igual a 0 (mm)

3.3.4.1.2.d. Necesidades totales de riego (N_t)

El cálculo se realizó a partir de las necesidades netas (N_n) para ello se consideró:

- Eficiencia de aplicación con un valor de 90 % para riego por goteo (E_f).

$$k = 1 - ef. \text{ aplicacion}$$

La Necesidad total (N_t) se la calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$N_t = \frac{N_n}{C_u(1 - k)}$$

Donde:

N_t = Necesidad total (mm día^{-1})

k = Coeficiente de pérdidas por percolación

C_u = Coeficiente de uniformidad (C_u) valor de 0,9 teniendo en cuenta una uniformidad al ser goteros no compensados.

3.3.4.1.2.e. Necesidad diaria por árbol

Se calculó de acuerdo al marco de riego en mm día^{-1}

$$N_{diarias} = Nt * a * b$$

Donde:

Nt = Necesidad total (mm día^{-1})

a = Separación entre plantas (m)

b = Separación entre laterales (m)

A continuación, se presentan los parámetros, dosis, frecuencia y tiempos de riego que siguen la metodología propuesta por Martínez (2014).

3.3.4.1.3. Parámetros de riego

Son los que condicionan al diseño hidráulico, todos estos parámetros están relacionados entre sí, por lo que es importante considerar el caudal del gotero (l h^{-1}) y la textura del suelo.

3.3.4.1. 3.a. Área mojada por gotero

Primero se determinó el diámetro mojado (D_s), para ello se consideró la textura del suelo y el caudal en l h^{-1} del emisor previamente seleccionado. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$D_s = 0,3 + 0,12 * q$$

Una vez obtenido el diámetro mojado (D_s) se calculó el área mojada (A_e) por emisor con la ecuación:

$$A_e = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

3.3.4.1.3.b. Número de goteros por planta

Se consideró que la planta de café es leñosa por lo que se utilizó la siguiente ecuación:

$$n_e \geq \frac{Sp * P}{100 * Ae}$$

Donde:

n_e = Número de goteros por planta (u)

P = Porcentaje de suelo mojado propuesto por Keller en casos de árboles para clima árido 33%

Sp = Disposición entre plantas (m^2)

Ae = Área mojada del gotero (m^2)

3.3.4.1.3.c. Separación entre goteros (Se)

De acuerdo con la metodología utilizada se toma un traslape (S) mínimo recomendado del 25 % y el radio húmedo (Rm) del emisor según la textura del suelo.

$$Se = Rm \left(2 - \frac{S}{100} \right)$$

Donde:

Se = Separacion entre emisores (m)

Rm = Radio humedo (m)

S = Traslape recomendado (%)

3.3.4.1.3.d. Porcentaje de superficie mojada real

Se utilizó la siguiente ecuación:

$$P = \frac{n_e * 100 * Ae}{Sp}$$

Donde:

n_e = Número de goteros por planta (u)

Ae = Área mojada del gotero por planta (m^2)

Sp = Disposición de plantas en (m^2)

El % de superficie mojada debe ser mayor a 25 %, sin alejarse excesivamente de ese valor, lo que supondría un solape exagerado.

3.3.4.1.4. Dosis, frecuencia y tiempos de riego

Para el cálculo de estos parámetros, se determinó:

3.3.4.1. 4.a. Lamina neta (mm)

Es la cantidad de agua necesaria para la restitución del agua que un cultivo ha consumido en cierto período de tiempo. Se calculó de acuerdo a:

$$Ln = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) * Prof * Da * Ur$$

Donde:

Ln = Lámina de riego (cm)

CC = Capacidad de campo (% θ_m)

PMP = Punto de marchitez permanente (% θ_m)

Prof = Profundidad radicular (cm)

Da = Densidad aparente (g cm⁻³)

Ur = Umbral de riego (%)

3.3.4.1.4.b. Frecuencia de riego (I)

Determina cuando regar, es decir cada que tiempo se debe aplicar el agua en el suelo, para reponer la lámina de riego.

$$I = \frac{Ln}{Nt}$$

Donde:

I = Frecuencia de riego (día)

Ln = Lamina neta o lámina de agua rápidamente aprovechable (mm)

Nt = Necesidad total de riego (mm día⁻¹)

3.3.4.1.4.c. Tiempo de riego

Es el tiempo que se emplea para aplicar la lámina rápidamente aprovechable al suelo, a fin de que el cultivo reponga desde el 50 % del umbral de riego hasta llegar a la capacidad de campo. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$t = \frac{Nt * I}{n_e * Qa}$$

Donde:

t = Tiempo de riego (h día⁻¹)

Nt = Necesidades totales (mm día⁻¹)

n_e = Número de emisores por planta (u)

Qa = Caudal del gotero (l h⁻¹)

I = Frecuencia de riego (día)

3.3.4.1.5 Cálculo del caudal en las tuberías del sistema de riego

3.3.4.1. 5.a. Caudal del lateral (Ql)

$$Ql = Qa * Ngl$$

Donde:

Ql = Caudal del lateral (l s⁻¹)

Qa = Caudal del emisor (l s⁻¹)

Ngl = Número de goteros por lateral (u)

3.3.4.1.5.b. Caudal de la terciaria (Qt)

$$Qt = Ql * Nl$$

Donde:

Qt = Caudal de la terciaria (l s⁻¹)

Q_l = Caudal del lateral ($l\ s^{-1}$)

N_l = Número de laterales (u)

3.3.4.1.5.c. Caudal de la secundaria (Q_s)

Para determinar el caudal de la tubería secundaria se aplica la siguiente ecuación:

$$Q_s = Q_t * N_t$$

Donde:

Q_s = Caudal de la secundaria ($l\ s^{-1}$)

Q_t = Caudal de la terciaria ($l\ s^{-1}$)

N_t = Número de terciarias en funcionamiento en el mismo momento (u)

3.3.4.1.5.d. Cálculo del caudal de la principal (Q_p)

El caudal de la tubería principal se lo determinó en base a la ecuación siguiente:

$$Q_p = Q_s * N_s$$

Donde:

Q_p = Caudal de tubería principal ($l\ s^{-1}$)

Q_s = Caudal de la tubería secundaria ($l\ s^{-1}$)

N_s = Número de tuberías secundarias en funcionamiento en el mismo momento (u)

3.3.4.2. *Diseño Hidráulico*

El diseño hidráulico consiste en determinar los componentes, dimensiones de la red y funcionamiento de la instalación de riego, de tal manera que pueda abastecer las necesidades de agua del cultivo en el tiempo que se haya establecido, teniendo en cuenta el diseño agronómico previamente realizado.

3.3.4.2.1. *Velocidad del agua en las tuberías*

Para calcular la velocidad del agua en las tuberías, se consideró el siguiente rango:

$$0,5\ m/s > V < 2,5\ m/s$$

Velocidades superiores a los 2,5 m/s dan lugar a problemas de arrastres, ruidos y fenómenos abrasivos en las paredes interiores que afectarían a la durabilidad de la tubería; mientras que, velocidades inferiores a 0,5 m/s podrían ocasionar problemas de sedimentación de partículas y residuos debida a la escasa velocidad de movimiento del agua (INEH, 2013). La velocidad media del flujo se calculó a partir de la siguiente ecuación:

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

Donde:

V = Velocidad media del agua en la tubería (m s⁻¹)

Q = Caudal (m³ s⁻¹)

A = Área de la sección circular interna de la tubería (m²)

3.3.4.2.2. Determinación del gráfico y ecuación del gotero

El gotero seleccionado para el presente diseño responde a las condiciones de topografía, características del suelo y tipo de cultivo; el mismo que es de la marca Naandanjain. J-Turbo Key Plus (Anexo 6). El catálogo no presenta la ecuación del gotero; sin embargo, del mismo catálogo se obtuvo descargas en l h⁻¹ para diferentes presiones en el rango de 5,0 a 35,0 m a intervalos de 5,0 m para una descarga de 4,0 l h⁻¹. Con los valores de estas dos variables se realizó una regresión, obteniéndose la gráfica presión Vs descarga y con ello el coeficiente K y el exponente x y consecuentemente la ecuación del gotero.

3.3.4.2.3. Cálculo de la presión permisible en la sub-unidad de riego

La subunidad de riego compuesta por laterales conectadas a una terciaria y controlados por un regulador de presión, es un componente fundamental del diseño de los sistemas de riego por goteo que permite obtener una alta uniformidad y la máxima eficiencia de aplicación de agua a la parcela, y con ello, optimizar el agua, conservar el suelo; y, elevar la producción y productividad de los cultivos.

En vista que las condiciones del área a implementarse el sistema de riego por goteo tiene una topografía plana (5,7 %) se optó por goteros no compensantes; por lo cual, para calcular la pérdida de presión permisible en la subunidad de riego (lateral y terciaria), se acogió el criterio de Monge (2018) el mismo que señala que la máxima diferencia de presión que puede haber en la subunidad de riego es aquélla que se produce cuando la diferencia de caudales

entre los emisores que arrojan el caudal máximo y mínimo es menor al 10 % del caudal nominal. Se aplicó la siguiente expresión:

$$\Delta q = 1 - \frac{q_{min}}{q_{máx}}$$

Donde:

Δq = Variación de caudales en subunidad de riego ($l\ h^{-1}$)

$q_{máx}$ = Caudal máximo ($l\ h^{-1}$)

q_{min} = Caudal mínimo ($l\ h^{-1}$)

Keshtgasr (2012) sugiere que cuando se eligen goteros no compensados para diseñar sistemas de riego por goteo, a fin de determinar la variación de presión en la subunidad, se proceda a partir de la ecuación del gotero, cuyo proceso es el siguiente:

$$q = Kh^x$$

$$dh = \frac{1}{x} * \frac{dq}{dh}$$

$$\Delta h = 1 - \frac{h_{min}}{h_{máx}} \leq \frac{1}{x \cdot 0.10 * h}$$

Donde:

Δh = Máxima diferencia de presión (entre dos emisores) en la subunidad de riego (m)

$h_{máx}$ = Presión máxima del gotero (m)

h_{min} = Presión mínima del gotero (m)

x = Exponente de descarga del emisor (adimensional)

h = Presión nominal del emisor (m)

Por lo general en goteros no compensados el valor del exponente x es de alrededor de 0,5 y reemplazando en la ecuación anterior con una presión nominal del gotero de 10 m se tendrá que la máxima variación de presión en la unidad de riego con respecto a la presión de funcionamiento del gotero es de 20 %. Es decir, para obtener una variación máxima de caudal

en la unidad de riego del 10 % la variación de presión debe de ser como máximo el 20 % de la presión de funcionamiento del gotero.

Esta expresión representa la máxima variación de presión que puede existir entre dos emisores de la subunidad, y viene definida por las pérdidas de carga de las tuberías (lateral y terciaria) y por las diferencias de sus cotas geométricas.

Por lo tanto, en el presente diseño, se considera, por un lado, las pérdidas de carga de las tuberías laterales y terciarias y por otro lado los desniveles de dichas tuberías. La pérdida total de carga admisible en la subunidad de riego se la determinó en base a la siguiente ecuación (Ortiz, 2020).

$$\Delta H_s = \Delta h_s \pm Z_l \pm Z_t$$

Donde:

ΔH_s = Pérdida de carga admisible total en la subunidad de riego (m)

Δh_s = Máxima variación de presión entre dos emisores de la subunidad (m)

Z_l = Desnivel de la tubería lateral (m)

Z_t = Desnivel de tubería terciaria (m)

(+) desnivel descendente

(-) desnivel ascendente

3.3.4.2. 3.a. Reparto óptimo de presiones en la subunidad

Una vez conocida la pérdida de carga admisible en la subunidad, ésta se repartió entre las distintas tuberías que componen la subunidad en base al criterio de Monge (2018) que propone el llamado Coeficiente de Forma (CF), cuya expresión es la siguiente:

$$CF = \frac{L_l}{L_t}$$

Donde:

CF = Coeficiente de forma (adimensional)

Ll = Longitud del lateral (m)

Lt = Longitud de la terciaria (m)

En vista que los laterales en el presente diseño son alimentados por un extremo, para determinar el reparto óptimo de presiones (R) en la subunidad, se utilizó la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\Delta Hl}{\Delta Hs} = \frac{0.842 * CF^{0.1577}}{S^{0.060}}$$

Donde:

R = Reparto óptimo de presiones

ΔHl = Pérdida de carga lateral (m)

ΔHs = Pérdida de carga en la subunidad (m)

CF = Coeficiente de forma

S = Distancia entre laterales de riego (m)

El valor del coeficiente de forma se lo reemplazó en la ecuación del reparto óptimo de presiones, obteniendo el porcentaje de la pérdida de carga admisible para el lateral y la diferencia le correspondió a la terciaria.

3.3.4.2.4. Cálculo de las pérdidas lineales por fricción (hf)

Para determinar las pérdidas de carga lineales en todas las tuberías del sistema (lateral, terciaria, secundaria y principal) se empleó la ecuación de Hazen - Williams, la misma que se presenta a continuación

$$hf = 1.21 * 10^{10} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} * D^{-4.87} * F * L$$

Donde:

hf = Pérdida de carga en la tubería (m)

Q = Caudal (l s⁻¹)

C = Coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional)

D = Diámetro interno (mm)

L = Longitud de la tubería (m)

F = Coeficiente de Christiansen (adimensional)

3.3.4.2. 4.a. Cálculo del Coeficiente de Christiansen (F)

El coeficiente F es considerado solamente para tuberías de salidas múltiples, ya que el caudal disminuye a medida que el mismo sale por los goteros y por ello las pérdidas de carga decrecen, por lo cual hay que corregirla utilizando el referido coeficiente. Se la emplea en el dimensionamiento de las tuberías laterales y terciarias principalmente; para ello se utilizó la siguiente fórmula (INEH, 2013).

$$F = \left(\frac{2n}{2n - 1} \right) * \left(\frac{1}{B + 1} \right) + \left(\frac{(B - 1)^{1/2}}{6n^2} \right)$$

Donde:

F = Factor de Christiansen (adimensional)

B = Depende del tipo de material de la tubería: P.V.C (1,8); polietileno (1,75); aluminio (1,9)

n = Número de salidas en la tubería (u)

3.3.4.2.5. Calculo de la tubería lateral

En primer lugar, se determinó la pérdida por conexión de los goteros; para ello se adoptó el criterio de Watters y Keller citado por Pastor (2019) que señala que la pérdida de fricción al salir el agua del gotero es equivalente a 0,23 m por cada emisor.

Por lo tanto, la longitud total del lateral se la calculó de la manera siguiente:

$$Lt = Ll + Le (n * 0,23 m)$$

Donde:

Lt= Longitud total del lateral (m)

Ll = Longitud del lateral (m)

Le = Longitud equivalente (m)

N = Número de goteros por lateral

3.3.4.2.5.a Presión al inicio del lateral

De acuerdo al presente diseño del sistema de riego, la posición de los laterales es descendente; consecuentemente, como las pérdidas por fricción (hf) en el lateral son menores al desnivel de lateral (hf < Hg); se aplican las siguientes ecuaciones para determinar la presión al inicio y final del lateral (Pizarro, 1990).

$$\frac{Po}{\gamma} = \frac{Pa}{\gamma} + \frac{3}{4}hfl - \frac{Hg}{2}$$

Donde:

$\frac{Po}{\gamma}$ = presión al inicio del lateral (m)

$\frac{Pa}{\gamma}$ = presión nominal del gotero (m)

hfl = pérdida de fricción en el lateral (m)

Hg = desnivel del lateral (m)

3.3.4.2.5.b. Presión al final del lateral

$$\frac{Pn}{\gamma} = \frac{Pa}{\gamma} - \frac{1}{4}hfl + \frac{Hg}{2}$$

Donde:

$\frac{Pn}{\gamma}$ = presión al final del lateral (m)

$\frac{Pa}{\gamma}$ = presión nominal del gotero (m)

h_{fl} = pérdida de fricción en el lateral (m)

H_g = desnivel del lateral (m).

3.3.4.2.6. Calculo de la tubería terciaria

La pérdida de carga que se produce en la conexión lateral – terciaria se la calculo en base la siguiente ecuación:

$$Le = 0.10 * Q_l^{0.30} * N^{0.26}$$

Donde:

Le = Longitud equivalente (m)

Q_l = Caudal del lateral ($l\ h^{-1}$)

N = Número de laterales (u)

Esta longitud equivalente se la sumó a la longitud de la terciaria para obtener la longitud real que sirvió para el dimensionamiento de la tubería en referencia.

3.3.4.2. 6.a. Presión al inicio de la tubería terciaria

Para calcular la presión al inicio de la tubería terciaria y en consideración que no existe desnivel ni accedente ni descendente, se empleó la siguiente ecuación (Ortiz, 2020).

$$\frac{P_t}{\gamma} = \frac{P_o}{\gamma} + \frac{3}{4} h_{ft}$$

Donde:

$\frac{P_t}{\gamma}$ = presión inicio de la terciaria (m)

$\frac{P_o}{\gamma}$ = presión inicio del lateral (m)

h_{ft} = pérdida de fricción en la terciaria (m)

3.3.4.2.7. *Variación de caudal y de presión en la subunidad de riego*

Para conocer la variación de caudal en la subunidad de riego, se utilizaron las presiones máximas y mínimas calculadas en la subunidad, y la ecuación del gotero; se aplicó la siguiente expresión matemática (Wu et al., 1979).

$$\Delta q = \left(\frac{q_{m\acute{a}x} - q_{m\grave{i}n}}{q_{m\acute{a}x}} \right) * 100$$

Donde:

Δq = variación del caudal (l h⁻¹)

$q_{m\acute{a}x}$ = caudal máximo (l h⁻¹)

$q_{m\grave{i}n}$ = caudal mínimo (l h⁻¹)

El exponente x del emisor, está relacionado directamente con la variación de flujo (Δq) en la subunidad de riego, e igualmente se relaciona con la variación de presión (Δh); por lo tanto, de manera similar, las presiones máximas y mínimas calculadas en la subunidad se utilizaron a fin de conocer la variación de presión (Δh), la misma que se calculó de la siguiente forma (Wu et al., 1979; citado por Amer et al., 2017).

$$\Delta h = \left(\frac{h_{m\acute{a}x} - h_{m\grave{i}n}}{h_{m\acute{a}x}} \right) * 100$$

Donde:

Δh = variación de presión en la subunidad (m)

$h_{m\acute{a}x}$ = presión máxima (m)

$h_{m\grave{i}n}$ = presión mínima (m)

3.3.5 Elaboración del manual de manejo y operación del sistema de riego por goteo

De acuerdo con el diseño a cada uno de los componentes que conforman el sistema de riego por goteo se elaboró un manual básico con las siguientes características:

- Acciones recomendadas para la instalación como: inspección, preparación del terreno etc.
- Acciones recomendadas de acuerdo a la operación y puesta en funcionamiento del sistema.
- Consideraciones generales de mantenimiento de los equipos que componen el sistema de riego.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación de la superficie de riego

Una vez obtenida la información topográfica a través de un programa software, se determinó que la superficie a irrigar es de 1 020 m² distribuida en 12 bloques de 8,0 x 7,50 m y 3 m de camino entre bloques.

Por las características de la planta de café en su estado final de desarrollo, la densidad de siembra es de 1,25 m entre laterales y 2,0 m entre plantas.

4.2 Descripción de la fuente abastecedora de agua y presión

El área de terreno a ser implementado con riego tecnificado cuenta con un reservorio de 200 m³ ubicado en la parte alta del Centro Binacional Técnico Zapotepamba; su fuente de abastecimiento es un canal de hormigón simple que suministra constantemente de agua al reservorio. La distancia desde el reservorio al área de riego es de 131 m y su desnivel es de 21 m (964 – 943 m s.n.m) equivalente a 2,1 bares de presión.

4.3 Características morfológicas, constantes físicas e hidrofísicas del suelo

4.3.1 Suelos del Perfil 1 (P₁Z)

Condiciones morfológicas. - Suelo muy profundo formado por tres depósitos secuenciales diferentes, el depósito más reciente tiene un espesor 40 cm en el cual se ha diferenciado un horizonte Ap (0 - 20 cm) y un AB (20 - 40 cm); el depósito intermedio tiene 50 cm de espesor y se lo ha denominado 2 Bt con fuerte estructura blocosa. El suelo es bien drenado, tiene las raíces muy finas, pocas y se encuentran a 100 cm de profundidad que atraviesan las fisuras de 5 mm de ancho, las raíces de los horizontes (Apk) y (ABk) son más abundantes tienen fuerte efervescencia (reacción del ácido clorhídrico) lo que indica una elevada presencia de carbonato de calcio en todo el perfil (Figura 5).

De acuerdo a Valarezo et al. (2007) el suelo corresponde a un fondo aluvio - coluvial en la mayor parte de su topografía con pendientes que van de suavemente inclinadas (2 – 6 %) a inclinada (6 – 13 %) lo que permite deducir que en el transcurso del tiempo la pendiente se ha mantenido en el rango con 5 % y que en la actualidad las superficies han sido rellenadas por el arrastre de sedimentos que han permitido la creación de nuevos horizontes Apk, ABk, y de los cuales se han mantenido los horizontes Btk de 16 cm de espesor siendo ahora el 2Btk y el

horizonte 2Ck de 40 cm de espesor actualmente denominado 3Ck. La descripción se presenta en el (Anexo 1).

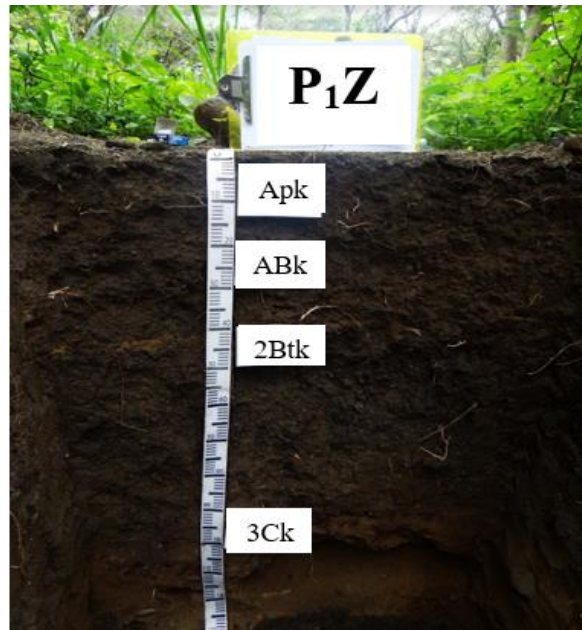


Figura 5. Perfil 1

4.3.2 Constantes hidrofísicas del suelo

Las proporciones adecuadas de agua, microorganismos, características de los minerales entre otros, son los factores que dan las condiciones adecuadas para que las plantas se desarrollen: En la Tabla 10 se presentan los resultados de los contenidos de humedad en unidades volumétricas a diferentes tensiones, la textura y la densidad aparente de los primeros horizontes.

Tabla 10. Determinación de las características físicas e hidrofísicas del suelo.

HORIZONTES	Profundidad Cm	Saturación pF = 0 %0v	CC pF = 2,52 %0v	PMP pF = 4,2 %0v	Da g cm ⁻³	Textura
P1Z Apk	00 – 20	49,3	38,8	33,0	1,35	Arcilloso (Ac)
		48,4	34,0	30,0		
		54,1	37,9	30,9		
Promedio		50,6	36,9	31,3		
P1Z ABk	20 – 40	46,3	34,8	30,1	1,52	Franco Arcilloso (FoAc)
		44,7	35,7	31,9		
		44,5	33,9	29,1		
Promedio		45,2	34,8	30,4		
Promedio Total		47,9	35,9	30,8	1,44	

Fuente: El autor.

La textura en el primer horizonte presenta un contenido de arena 27 %, limo 32 % y arcilla 41 %, corresponde a un suelo arcilloso (Ac); mientras que, en el segundo horizonte, presenta: arena 37 %, limo 30 % y arcilla 33 % clasificado como un suelo franco arcilloso (FoAc). En el Anexo 2 se muestra los resultados puntuales de la textura.

La densidad aparente (D_a) del suelo para el primer y segundo horizonte (0 – 20; 0 – 40 cm) es de 1,35 y 1,52 g cm⁻³ respectivamente. De acuerdo al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) el primer horizonte se encuentra en un rango óptimo puesto que las densidades menores a 1,44 g cm⁻³ son adecuados para la agricultura, mientras que con valores superiores a dicho valor son suelos con problemas de manejo; sin embargo, la segunda capa es mayor por lo que se presenta un suelo saturado con un volumen de espacios vacíos ocupados por el agua.

En vista que la diferencia del promedio de las tres replicas sobre los contenidos de humedad en términos de volumen a diferentes tensiones de los dos primeros horizontes es muy pequeña; se obtuvo el promedio de las dos capas; así, el porcentaje de saturación a $pF = 0$ es de 47,9 % θ_v , resultado que se encuentra en el límite superior del valor reportado por Valarezo et al. (1998) citado por Maza (2020) quien describe que en el rango de 40 – 50 % θ_v , los suelos de textura fina logran tener mayor porcentaje de saturación y porosidad que los de textura gruesa.

La capacidad de campo (CC) a $pF = 2,52$ para los dos horizontes es de 36,9 y 34,8 % θ_v , dando un valor promedio de 35,9 % θ_v y de acuerdo a Fernández (2010) este valor indica que la humedad existente en el suelo es la suficiente para que los cultivos crezcan adecuadamente y se desarrollen, ya que estas capas retienen una elevada cantidad de humedad después de haberse drenado el agua de los macro-poros (diámetro $>30 \mu$).

Así mismo, el valor de los dos horizontes del punto de marchitez permanente a $pF = 4,2$ es de 32,3 y 30,4 % θ_v , dando un valor promedio de 30,8 % θ_v al respecto, Lall y Shulka (2004) citados por Valarezo et al. (2020) señalan que el punto de marchitez permanente esta principalmente gobernado por la cantidad y naturaleza de la arcilla; así, el PMP es mayor en suelos con un elevado contenido de arcilla y aún más alto en arcillas de tipo 2:1 y por el resultado obtenido en este estudio y las grietas observadas en terreno cuando el suelo se encuentra seco es muy probable que sean expansivas del tipo montmorillonita.

4.3.3 Evaluación de las condiciones físicas del suelo

Tabla 11. Rangos importantes de la curva característica de humedad del suelo

EQUIVALENCIA				
AA	CA	VFI	ZONA	CLASE
% θ_v	% θ_v	% θ_v		
5,1	12	82,9	I	Muy Pobre

Fuente: El autor.

Como se observa en la Tabla 11 la capacidad de aireación del suelo es de 12 % θ_v resultado que determina que el suelo se encuentra en un buen nivel de aireación, esto se puede confirmar con lo que señalan Valarezo et. al (1998) que mencionan que la aireación en los suelos de 10 – 15 % θ_v es satisfactoria para el buen desarrollo de las plantas. Así mismo, Fernández (2010) señala que la aireación en el suelo es importante para el movimiento del agua, nutrientes y el intercambio de aire en la zona radicular.

El agua aprovechable calculada es 5,1 % θ_v y según Valarezo et. al (1998) anotan que los rangos óptimos en el suelo van de 9 a 15 % θ_v lo que indica que este porcentaje de agua presente en el suelo no es beneficioso para el cultivo; en esta misma tendencia Kirkham (2014) señala que los suelos con un alto contenido de agua aprovechable, tiene mayor potencial de producir biomasa vegetal que aquellos con un bajo contenido.

El volumen de poros físicamente inerte es de 82,9 % θ_v correspondiente a un valor muy alto, considerando que hay una predominancia de poros inútiles de diámetros menores 0,2 micras, que no aportan ni con aire ni con agua a la planta.

Con la ayuda del diagrama triangular se evaluó las condiciones físicas de este suelo, cuyo resultado se ubica en la zona I correspondiente a muy pobre (Anexo 3).

4.3.4 Curva de retención de humedad

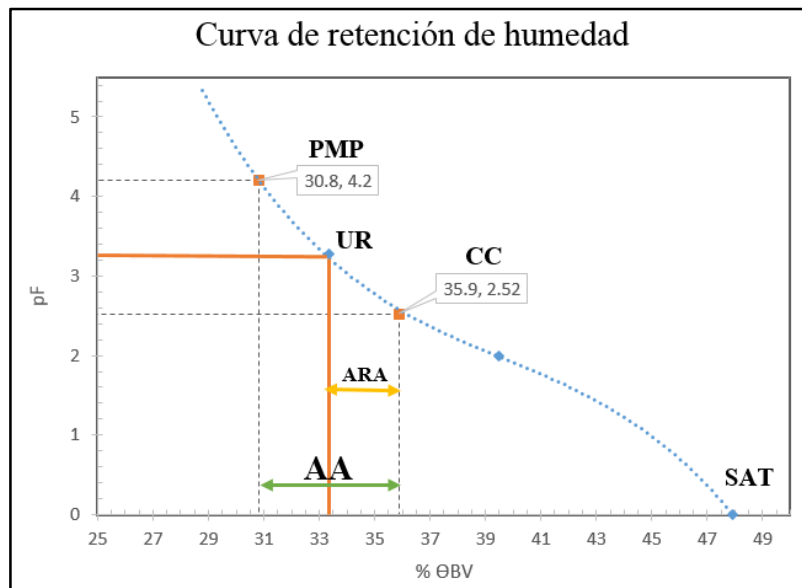


Figura 6. Curva de retención de humedad del suelo

Fuente: El autor

La curva característica de humedad del suelo promedio de los dos primeros horizontes se presenta en la Figura 6, en donde se observan los resultados de los contenidos de humedad a diferentes tensiones y de manera gráfica los valores de agua aprovechable, capacidad de aireación y volumen de poros físicamente inertes, los que obviamente coinciden con los calculados de manera analítica, en la cual sobresale el alto valor (30,8%θv) del punto de marchitez permanente, que es muy característico de suelos arcillosos expansivos de tipo 2:1

4.4 Diseño Agronómico del sistema de riego por goteo

4.4.1. Requerimientos de riego para el cultivo de café

En la Tabla 12 se visualizan los valores de requerimientos de riego para el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en mm día⁻¹ para el periodo de un año.

Tabla 12. *Requerimientos de riego para el cultivo de café.*

REQUERIMIENTOS DE RIEGO.													
1990 – 2015													
Parámetros	Ene.	Febr.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agost.	Sept	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.
ETo (mm día ⁻¹)	4,09	4,17	4,17	3,95	3,64	3,47	3,67	4,21	5,00	5,45	5,46	5,12	4,37
Kc (mm día ⁻¹)	0,75	0,74	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81	0,81	0,80	0,79	0,76	0,73	0,78
ETc (mm día ⁻¹)	3,07	3,09	3,17	3,08	2,88	2,78	2,97	3,41	4,00	4,31	4,15	3,74	3,39
Pe (mm día ⁻¹)	4,38	4,65	4,14	3,35	1,34	0,29	0,15	0,09	0,32	0,66	0,88	1,71	1,83
Nr (mm día ⁻¹)	-	-	-	-	1,54	2,49	2,82	3,32	3,68	3,65	3,27	2,03	1,90
Eficiencia del sistema (%)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
NB (mm día ⁻¹)	-	-	-	-	1,70	2,76	3,13	3,69	4,09	4,05	3,63	2,25	2,11
Caudal ficticio (l s ⁻¹ ha ⁻¹)	-	-	-	-	0,20	0,32	0,36	0,43	0,47	0,47	0,42	0,26	0,24

Fuente: El autor.

4.3.4.1 *Evapotranspiración de referencia (ETo)*

Los valores máximos y mínimos de la evapotranspiración de referencia para la zona de estudio son de 5,46 y 3,47 mm día⁻¹ correspondiente a los meses de noviembre y junio respectivamente y el valor promedio de 4,37 mm día⁻¹. Siendo importante conocer este parámetro ya que, Alburquerque (2015) indica que la verdadera necesidad de agua para el cultivo se desarrolla en condiciones óptimas de humedad y se encuentra influenciado por los diferentes parámetros climáticos de la zona de estudio.

Así mismo, Torres (2016) en su estudio titulado “RESPUESTA DEL CULTIVO DE MANI (*Arachis Hipogea* L.) A DOS MÉTODOS DE RIEGO A PRESIÓN EN EL VALLE DE CASANGA, PROVINCIA DE LOJA, determinó un valor ETo promedio de 4,41 mm día⁻¹ por el método del tanque evaporímetro clase A, y al obtenerse un valor (4,37 mm día⁻¹ promedio) (Tabla 12), es relevante dada la corta distancia y las condiciones climáticas similares entre los dos sitios de estudio, por lo cual da consistencia a los datos obtenidos en la presente investigación. Algo similar, determino Merino (2014) en su trabajo de investigación de riego a presión trabajando con una ETo de 5 mm en el Valle de Casanga. De esta manera, se demuestra que los valores de ETo de la presente investigación al ser comparados con otras investigaciones presentan similitud.

4.3.4.2 *Coefficiente del cultivo (Kc)*

En cuanto valor del Kc que se observa en la Tabla 12 el valor es bastante homogéneo en un rango de 0,74 a 0,81 ha lo largo del año, esto se da a pesar que el número de hojas por

planta se va reduciendo hasta ser un mínimo en la sombra del 75% y por consiguiente el área foliar no cambia significativamente (Sotomayor, 1993).

4.3.4.3 Evapotranspiración de cultivo (ET_c)

La evapotranspiración de cultivo debido a las condiciones climatológicas de la zona de estudio en el mes de junio presenta el valor más bajo de ET_c de 2,78 mm día⁻¹, mientras que, octubre es el mes con mayor evapotranspiración del cultivo con un valor de 4,31 mm día⁻¹, este valor máximo de ET_c sirve de base para dar inicio al diseño de cualquier tipo de sistema de riego tecnificado.

4.3.4.4 Precipitación Efectiva (Pe)

La precipitación efectiva en el área de estudio según se muestra en la Tabla 12 el mes de febrero se da el mayor valor (4.65 mm día⁻¹), mientras tanto que el resultado más bajo se lo obtiene en el mes de Agosto con 0.09 mm día⁻¹. Al respecto, Martínez (2014) muestra que para el diseño de sistemas de riego es importante conocer su valor como la parte de precipitación efectivamente almacenada y retenida por la zona radicular a profundidad aprovechable de la planta.

4.3.4.5 Necesidades de riego (Nr)

La Necesidad de riego máxima es de 3,68 mm día⁻¹ en el mes de Septiembre, según se indica en la Tabla 12 y el mes de menor demanda hídrica (1,54 mm día⁻¹) del cultivo de café se da en el mes de mayo. Por lo cual, se justifica la implementación del sistema de riego en el área de estudio.

4.3.4.6 Necesidades brutas (NB)

Como se observa en la Tabla 12 los meses de enero, febrero, marzo y abril no requieren de riego, ya que la precipitación es mayor a las necesidades de agua del cultivo. Además, los valores extremos de las necesidades brutas de riego, les corresponden a los meses de septiembre (4,1 mm día⁻¹) y mayo (1,70 mm día⁻¹).

4.3.4.7 Caudal ficticio continuo (Qc)

A los meses de septiembre y octubre les corresponde el mayor valor del caudal ficticio continuo con 0,47 l s⁻¹ ha⁻¹ esto se produce por un lado, a que los referidos meses forman parte de la época de verano con el 17,3 % (147,2 mm) de la precipitación anual; y por otro lado, porque los meteoros climáticos como temperatura, velocidad del viento, insolación, etc; son

más altos que el resto de meses, y consecuentemente se requiere mayor cantidad de agua para las plantas y mientras que el mes con el menor requerimiento de riego es mayo con $0,20 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

4.4.2. Necesidad neta de agua del cultivo café

4.4.2.1 Correcciones por efecto de localización (Kl)

Para las correcciones por (Kl) se considera la fracción del área sombreada con respecto a la superficie total proyectada de la planta, donde el diámetro de la copa del café es de 1,43 m.

$$A = \frac{\pi D m^2}{4(a * b)}$$

$$A = \frac{3.1416 \times (1,43\text{m})^2}{4(1,25 \times 2)}$$

$$A = 0,64 \text{ m}^2$$

El valor de A calculado se lo aplica en las siguientes fórmulas:

$$\text{Aljibury} \Rightarrow Kl = 1,34 * A \quad Kl = 0,86$$

$$\text{Decroix} \Rightarrow Kl = 0,1 + A \quad Kl = 0,74$$

$$\text{Hoare} \Rightarrow Kl = A + 0,5(1 - A) \quad Kl = 0,82$$

$$\text{Keller} \Rightarrow Kl = A + 0,15(1 - A) \quad Kl = 0,69$$

La corrección por localización fue de 0,78 en promedio, en base a los valores de Decroix y Hoare

4.4.2.2. Correcciones por condiciones locales

Se realizaron correcciones debidas a la variación del clima, se utilizó el criterio de Hernández Abreu con un $K_v = 1,2$ debido a que en el riego por goteo el suministro de agua es preciso y se proporciona estrictamente la cantidad de agua requerida por la planta por lo cual es necesario incrementar las necesidades para corregir las épocas deficitarias.

La advección es el proceso de energía horizontal, su valor se determinó mediante la utilización de un gráfico que consideró el efecto de la superficie ($1\ 020 \text{ m}^2$) de la zona que se

va a regar y el tipo de cultivo (café), siendo $Ka = 1,12$ este factor corrige el efecto de los cultivos colindantes, considerando que las parcelas contiguas no afectan a la nuestra.

Con estos valores se obtuvo las necesidades de agua para la planta, que son:

$$E_{trl} = Nb \times Kl \times Kv \times Ka$$

$$E_{trl} = 4,09 \times 0,78 \times 1,2 \times 1,12$$

$$E_{trl} = 4,29 \text{ mm día}^{-1}$$

4.4.2.3. Necesidades netas de riego (Nn)

Es necesario indicar que de acuerdo con las condiciones climáticas del sitio de estudio, tanto la precipitación efectiva (Pe), el aporte capilar (Gw) y la variación de humedad del suelo entre dos riegos (Δw) son despreciables, por lo tanto, las necesidades netas serán igual a la evapotranspiración del mes de máxima demanda.

Siendo así: $Nn = E_{trl}$

$$Nn = 4,29 \text{ mm día}^{-1}$$

4.4.2.4. Necesidades totales de riego (Nt)

Se considera las pérdidas por percolación en riegos localizados y solo en casos extremos las pérdidas serán por escorrentía.

En pérdidas por percolación (K) el agua aplicada al suelo se infiltra hacia capas más profundas, la capacidad de retención en estos casos es menor que la cantidad de agua aplicada, se pierde el agua.

$$K = 1 - 0,9$$

$$K = 0,10$$

$$N_{totales} = \frac{Nn}{Cu(1 - k)}$$

$$N_{totales} = \frac{4,29 \text{ mm día}^{-1}}{0,9 (1 - 0,10)}$$

$$N_{totales} = 5,3 \text{ mm día}^{-1}$$

4.4.2.5. Necesidades diarias por árbol y Caudal ficticio continuo Q_c

En base a las necesidades totales de riego y al marco de plantación (1,25 m x 2,0 m) las necesidades totales (N_t) fueron:

$$N_{diarias} = N_t * a * b$$

$$N_{diarias} = 5,3 \text{ mm día}^{-1} * 1,25 \text{ m} * 2,0 \text{ m}$$

$$N_{diarias} = 13,25 \text{ l planta día}^{-1}$$

4.4.3. Parámetros de riego

Antes de iniciar con el dimensionamiento de los parámetros de riego se seleccionó un gotero con las características mencionadas a continuación:

4.4.3.1 Características generales del gotero seleccionado

Se seleccionó un gotero no compensante de marca Naandanjain. J-Turbo Key Plus, desarmable de botón, que puede ser abierto para facilitar su limpieza. A continuación, se presentan las características del gotero seleccionado:



Tipo	NPC (no compensados)
Color	Negro
Caudal	4 (l h ⁻¹)
Presión	0,5 – 2,5 (bar)
CV	3 %

Figura 7. Tipo de gotero seleccionado.

4.4.3.2. Área mojada por emisor

El valor del diámetro húmedo de acuerdo a la textura de 0,78 m y el área mojada por emisor es de 0,48 m².

$$A_{me} = \frac{\pi * Dm^2}{4}$$

$$A_{me} = \frac{3,1416 * (0,78 m)^2}{4}$$

$$A_{me} = 0,48 m^2$$

4.4.3.3. *Número de goteros por planta*

$$n_e = \frac{1,25 * 2 * 33 \%}{100 * 0,48 m^2}$$

$$n_e = 1,7 \text{ goteros} \leftrightarrow 2 \text{ emisores/árbol}$$

4.4.3.4. *Cálculos de la separación entre goteros (Se)*

Tal como se mencionó en metodología, se toma un valor de solape mínimo de 25 % el cual garantiza la existencia de un buen solape.

$$Se = 0,39 * \left(2 - \frac{25}{100}\right)$$

$$Se = 0,68m \Leftrightarrow 0,70m$$

Con la separación de los emisores (0,70 m) se obtiene la superficie mojada por cada emisor que es de 1 m². Fernández (2011) menciona que con separaciones de goteros que se 0,6 a 0,8 m mojan alrededor de un 80 % de la superficie sombreada lo que garantiza la eficiente aplicación de agua hacia el cultivo.

4.4.3.5. *Porcentaje de superficie mojada real*

Una vez obtenida la separación entre los goteros se obtiene un porcentaje de suelo mojado:

$$P = \frac{e * 100 * A_{me}}{S_p}$$

$$P = \frac{2 * 100 * 0,48 m^2}{1,25 m * 2,0 m}$$

$$P = 38 \%$$

El número de emisores (2 u), el área mojada ($0,48 \text{ m}^2$) y su disposición ($1,25 \times 2,0 \text{ m}$) garantizan un porcentaje de suelo mojado igual a 38 %. Ulloa (2012) indica que el porcentaje debe ser mayor a 25 % sin alejarse excesivamente del valor, lo que supondría un solape exagerado; también menciona que es importante para el desarrollo radicular de la planta y es un indicador que confirma que el espaciamiento del emisor y número de emisores son óptimos para el cultivo.

4.4.4. Dosis, frecuencia y tiempos de riego

Se determinó lo siguiente:

4.4.4.1 Lámina edáfica (mm)

Se obtiene una lámina edáfica en mm, que debe ser repuesta o recuperada durante los tiempos de riego:

$$Ln = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) * Prof * Da * Ur$$

$$Ln = \left(\frac{24,9 - 21,4}{100} \right) * 40 * 1,44 * 0,50$$

$$Ln = 1,08 \text{ cm}$$

$$Ln = 10,1 \text{ mm}$$

En vista que, en el riego por goteo toda el área del suelo no se moja como en el riego de superficie o aspersión, es importante corregir la lámina. Se corrigió multiplicando la lámina edáfica (Ln) por el porcentaje de suelo mojado (%), siendo así:

$$\text{Lámina edáfica corregida} = Ln * \%P$$

$$\text{Lámina edáfica corregida} = 10,1 * 0,38$$

$$\text{Lámina edáfica corregida} = 3,8 \text{ mm}$$

4.4.4.2. Frecuencia de riego (I)

El aporte de agua para satisfacer las demandas hídricas del cultivo debe ser cada 1 día.

$$I = \frac{Ln}{Nt} = \frac{3,8 \text{ mm}}{5,3 \text{ mm día}^{-1}} = 0,72 \Leftrightarrow 1 \text{ día}^{-1}$$

4.4.4.3. *Tiempo de riego (t)*

El tiempo que debe aplicarse el agua mediante el riego por goteo es de 1,65 horas, sin embargo; es importante redondear el tiempo a 2 horas al día de riego, considerando el incremento como un porcentaje para el proceso de lavado del suelo.

$$t = \frac{N_{diarias}}{e * qa} = \frac{13,25 \text{ l arbol día}^{-1}}{2u * 4 \text{ l h}^{-1}} = 1,65 \text{ horas} \leftrightarrow 2 \text{ horas}$$

4.4.4.4. *Volumen de agua por gotero*

El volumen de agua que satisface las necesidades hídricas totales de la planta de café es de 6,63 litros emisor⁻¹.

$$Ve = \frac{N_{diarias} * I}{e}$$
$$Ve = \frac{13,25 \text{ l arbol día}^{-1} * 1 \text{ día}^{-1}}{2 u}$$
$$Ve = 6,63 \text{ l emisor}^{-1}$$

4.4.4.5. *Caudal necesario para regar el sistema*

$$Qnec = Qa * \text{Número de goteros}$$

$$Qnec = 4 \text{ l h}^{-1} * 720$$

$$Qnec = 2880 \text{ l h}^{-1}$$

$$Qnec = 0,80 \text{ l s}^{-1}$$

4.5 **Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo**

El diseño del sistema de riego por goteo consta de tres subunidades, las mismas que operaran en tiempos distintos. Cada subunidad consta de una tubería terciaria y cinco tuberías laterales en donde irán insertados 48 goteros; consecuentemente, los caudales de diseño para las tuberías secundaria y principal son iguales (0,80 l s⁻¹). Todos los laterales con sus respectivas terciarias están alimentados por un extremo.

Para el diseño hidráulico del sistema de riego por goteo, se consideró del diseño agronómico, entre otros aspectos, la densidad de siembra del cultivo del café (1,25 x 2,0 m),

en la cual se ubicarán dos goteros por planta. El resumen de los resultados del diseño se presenta en la Tabla 13 y el proceso de cálculo en el Anexo 7.

4.5.1. Sistema de filtrado

Con la finalidad de evitar la obstrucción de los goteros, se ha previsto instalar un filtro de tipo anillas, cuyas características técnicas son las siguientes:

Marca: Alfa

Modelo: 20015C1T. Diámetro $\frac{3}{4}$

$Q = 80 \text{ l min}^{-1}$

Pérdidas de presión: 3,0 m

Mesh: 120

4.5.2 Pérdida total admisible en la subunidad de riego

En la Figura 8 se observa el resultado de la regresión entre las variables presión Vs caudal y consecuentemente la ecuación del gotero.

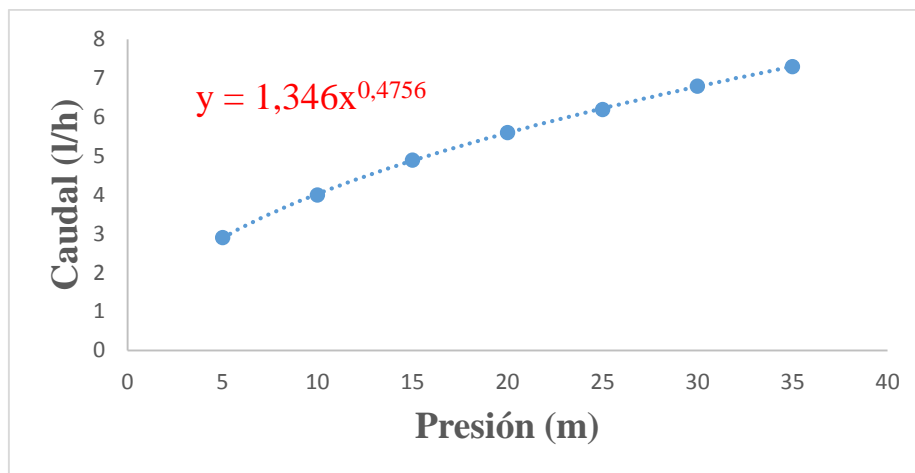


Figura 8. Regresión entre la presión y caudal del gotero

Con los resultados de la regresión, la ecuación del gotero seleccionado es la siguiente:

$$q = 1,34 h^{0,48}$$

En base a la ecuación del gotero se calculó la variación de presión en la subunidad de riego de la manera siguiente:

$$\Delta P_s = h_{m\acute{a}x} - h_{min} \leq \frac{1}{x \ 0,1 * h}$$

$$\Delta P_s = \frac{1}{0,48} * 0,1 * 10$$

$$\Delta P_s = 2,1m \approx 2,0$$

La pérdida total admisible en la subunidad de riego es la siguiente:

$$\Delta H_s = \Delta P_s \pm Z_l \pm Z_t$$

$$\Delta H_s = 2,0 + 2,0 - 0$$

$$\Delta H_s = 4,0 \text{ m}$$

4.5.2.1. Reparto óptimo de presiones (R)

En primer lugar, se determinó el coeficiente de forma (CF)

$$CF = \frac{L_{lat}}{L_{Ter}}$$

$$CF = \frac{35 \text{ m}}{14 \text{ m}}$$

$$CF = 2,5$$

El reparto óptimo de presiones fue de 0,93 como lo demuestra la siguiente expresión:

$$R = \frac{0,842 * CF^{0,1577}}{S^{0,060}}$$

$$R = \frac{0,842 * 2,5^{0,1577}}{2^{0,060}}$$

$$R = 0,93$$

El 93% de la presión admisible en la subunidad de riego le corresponde a la tubería lateral y el 7% restante a la terciaria.

$$\Delta h_{lat} = 4,0 \text{ m} * 93 \%$$

$$\Delta h_{lat} = 4,0 * 0,93$$

$$\Delta h_{lat} = 3,72 \text{ m}$$

$$\Delta h_{ter} = 4,0 * 7\%$$

$$\Delta h_{ter} = 4,0 \text{ m} * 0,07$$

$$\Delta h_{ter} = \mathbf{0,28 \text{ m}}$$

De los resultados obtenidos, se observa que hay un alto porcentaje de la presión admisible para el lateral; sin embargo, las pérdidas totales en la subunidad de riego no deben ser mayores de 4,0 m

4.5.3. Dimensionamiento de la tubería lateral

4.5.3.1. Longitud equivalente para la tubería lateral

Para conocer la longitud total del lateral para su dimensionamiento, se consideró la longitud equivalente de la manera siguiente:

$$L_t = L_l + L_e (n * 0,23)$$

$$L_t = 35 \text{ m} + L_e (48 \text{ m} * 0,23)$$

$$L_e = 46,04 \text{ m} \approx 46 \text{ m}$$

4.5.3.2. Pérdida de fricción en la tubería lateral

La longitud, diámetro interno y el caudal que fluye por la tubería lateral fue de 46 m, 10 mm y 0,053 l s⁻¹ en su orden. Las pérdidas de carga fueron de 1,1 m menor a la carga admisible de 3,72 m resultado que conjuntamente con la velocidad del agua (0,70 m/s) permite admitir el tipo de tubería diseñada. En la Tabla 13 se presenta un resumen de los resultados; mientras que en el (Anexo 7) literal d) se anota el proceso metodológico de cálculo.

4.5.3.3. Presión origen del lateral

En vista que el lateral tiene una posición descendente y que las pérdidas por fricción (hf) son menores a las del desnivel del lateral (Hg), se aplicó la siguiente ecuación para determinar la presión al inicio del lateral (presión mínima), la misma que fue de 9,8 m.

$$\frac{P_o}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} + \frac{3}{4} h_{fl} - \frac{H_g}{2}$$

$$\frac{P_o}{\gamma} = 10 \text{ m} + \frac{3}{4} (1,1 \text{ m}) - 1,0 \text{ m}$$

$$\frac{P_o}{\gamma} = 9,8 \text{ m}$$

4.5.3.4. *Presión al final del lateral (máxima)*

Aplicamos la siguiente fórmula para conocer la presión al final del lateral.

$$\frac{P_n}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - \frac{1}{4} hfl + \frac{Hg}{2}$$

$$\frac{P_n}{\gamma} = 10 \text{ m} - \frac{1}{4} (1,1) + 1,0$$

$$\frac{P_n}{\gamma} = 10,7 \text{ m}$$

La presión al final del lateral (10,7 m) es mayor que al inicio (9,8 m); es decir, la presión máxima es al final y la presión mínima se da en el origen del lateral.

4.5.4. *Dimensionamiento de la tubería terciaria*

4.5.4.1. *Pérdidas de carga por conexión lateral - terciaria*

Las pérdidas de carga localizadas ocasionadas por el punto de conexión de la tubería lateral con la terciaria son:

$$L_e = 0,10 * Q_l^{0,30} * N^{0,26}$$

$$L_e = 0,10 * 191^{0,30} * 5^{0,26}$$

$$L_e = 0,72 \text{ m}$$

$$L_{ter} = L_r + L_e$$

$$L_{ter} = 12 \text{ m} + 0,72 \text{ m}$$

$$L_{ter} = 12,72 \text{ m} \approx 13 \text{ m}$$

La tubería terciaria tiene una longitud de 13 m; sus diámetros externos e internos son de 20 mm y 16,8 mm respectivamente. Con un caudal de 0,27 l s⁻¹ la velocidad del agua es 1,23 m s⁻¹ y la pérdida de energía por fricción es de 0,59 m. En la Tabla 13 se puede observar el resumen de los resultados y en Anexo 7 literal c) se presenta el proceso metodológico del cálculo.

4.5.4.2. Presión origen de la terciaria

La presión en el inicio de la terciaria es de 10,2 m tal como se demuestra a continuación:

$$\frac{Pt}{\gamma} = \frac{Po}{\gamma} + \frac{3}{4} hfl$$

$$\frac{Pt}{\gamma} = 9,8 \text{ m} + 0,75 (0,59) \text{ m}$$

$$\frac{Pt}{\gamma} = 10,2 \text{ m}$$

4.5.5. Variación de caudal y de presión en la subunidad

La máxima presión producida en la subunidad de riego es de 10,7 m (final del lateral) y la mínima de 9,8 m (inicio lateral), resultados que, con la ayuda de la ecuación del gotero, permitieron calcular la variación de caudal en la subunidad de riego.

$$Q = 1,34h^{0.48}$$

$$Q = 1,34(10,7)^{0.48}$$

$$Q = 4,2 \text{ l s}^{-1}$$

$$Q = 1,34h^{0.48}$$

$$Q = 1,34(9,8)^{0.48}$$

$$Q = 4,01 \text{ l s}^{-1}$$

$$\Delta q = \left(\frac{h_{\text{máx}} - h_{\text{mín}}}{h_{\text{máx}}} \right) * 100$$

$$\Delta q = \left(\frac{4,2 - 4,0}{4,2} \right) * 100$$

$$\Delta q = 4,8 \% < 10 \%$$

La variación de caudal de 4,8 % es menor a la norma general establecida, la misma que señala que la variación máxima de caudal que tiene que producirse en la subunidad de riego cuando se usan goteros no compensados tiene que ser $\leq 10 \%$.

$$\Delta h = \left(\frac{h_{m\acute{a}x} - h_{m\acute{i}n}}{h_{m\acute{a}x}} \right) * 100$$

$$\Delta h = \left(\frac{10,7 - 9,8}{10,7} \right) * 100$$

$$\Delta h = 8,5 \%$$

En la se observa la relación entre la variación de caudal y la variación de presión que se produce en la subunidad de riego. El valor del exponente x de la ecuación del gotero no compensados Figura 9, generalmente, es de 0,5 consecuentemente, una variación de presión de 20 % equivale a una variación de 10 % del caudal del gotero; igualmente una variación de presión de 10 % le corresponde una variación del 5% de la variación del caudal. Los resultados obtenidos de manera analítica en el presente trabajo, indican que una variación de presión en la subunidad de riego de 8,5 % es equivalente a una variación de caudal del 4,8 % como se observa en la siguiente Figura.

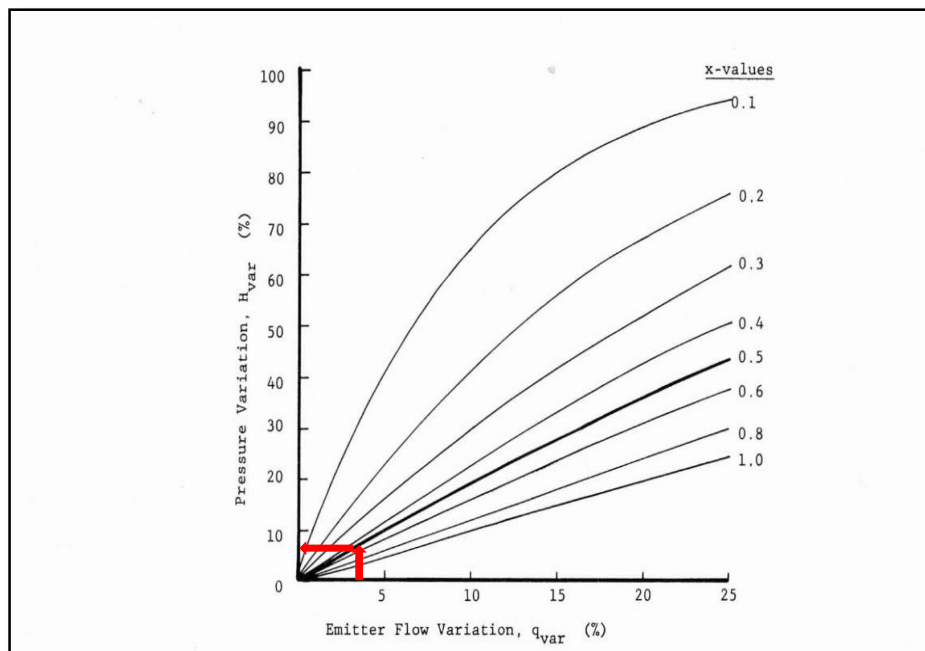


Figura 9. Relación entre la variación de caudal (Δq) y la variación de presión (Δh) para diferentes valores del exponente x

4.5.5. Dimensionamiento de la tubería secundaria

La pérdida de carga por fricción (h_f) producida en la tubería secundaria es de 1,13 m, resultado producto de un diámetro interno y longitud de la tubería de 28,8 mm y 23 m en su

orden y por el que fluye un caudal de $0,80 \text{ l s}^{-1}$. La velocidad se encuentra dentro del margen establecido ($1,13 \text{ m s}^{-1}$). En la Tabla 13 se puede observar el resumen de los resultados y en el Anexo 7 literal b) se presenta el proceso metodológico del cálculo.

4.5.6. Dimensionamiento de la tubería principal

La tubería principal es de material PVC con una longitud de 131 m; sus diámetros externo e interno son de 40 y 36 mm respectivamente, por donde circula un caudal de $0,80 \text{ l s}^{-1}$. La pérdida de carga por fricción (h_f) es de 2,36 m, y la velocidad del agua es de $0,80 \text{ m s}^{-1}$ que se encuentra dentro del rango normal.

Tabla 13. Dimensionamiento de tuberías del sistema de riego por goteo

Tubería	Diámetro interno (mm)	Diámetro externo (mm)	Factor de Christiansen F	Desnivel ΔH (m)	Hf (m)	Velocidad (m s^{-1})
Lateral	10,0	12	0,36	- 2,00	1,1	0,70
Terciaria	16,8	20	0,40	0,0	0,59	1,23
Secundaria	28,8	32	-	0,10	1,13	1,14
Principal	36,0	40	-	-21,0	2,36	0,80
TOTAL (incluido 10 % por accesorios)					5,7	

4.5.7. Requerimiento total de energía para el funcionamiento del sistema de riego por goteo

De las pérdidas totales por fricción en el sistema de tuberías (5,2 m) se consideró un 10 % como pérdidas de carga localizadas (adaptadores, válvulas, reductores, etc.) (0,52 m); mientras que las pérdidas de carga en el filtro son de 3 m y la presión de trabajo del gotero de 10 m.

El requerimiento de carga total del sistema de riego por goteo para su funcionamiento es de $18,7 \text{ m} \approx 19 \text{ m}$. Considerando que hay una carga por diferencia de nivel geométrica, entre el reservorio y el área de riego de 21 m; el sistema no tendría ningún impedimento para un funcionamiento eficiente.

4.6 Manual de manejo y operación del sistema de riego por goteo

Manual de manejo y operación del sistema de riego por goteo en el cultivo de café en el Centro Binacional Técnica Zapotepamba.

4.6.1 Antecedentes

El presente manual muestra la orientación sobre el mantenimiento y operación que se le puede dar al sistema de riego por goteo, estas recomendaciones se originan mediante aspectos agronómicos como son laminas, tiempos y frecuencias de riego, diseñados especialmente para la época de escasas hídrica, aspectos hidráulicos en cuanto a la red hidráulica, equipo de filtrado, fertirriego y emisores.

El manual muestra las recomendaciones básicas que contribuyen a mejorar el mantenimiento y operación del sistema de riego por goteo; así como, instrucciones, recomendaciones y procedimientos de mantenimiento y operación para que el propietario una vez que el sistema esté instalado organice sus actividades para asegurar la vida útil y el eficiente funcionamiento del sistema de riego por goteo. El manual puede ser continuamente actualizado por el propietario de acuerdo a sus requerimientos.

4.6.2. Consideraciones generales al momento de instalar

Antes de la instalación se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

4.6.2.1. *Recepción de los materiales*

Al momento de receptar los materiales se debe tener a mano el listado en el que consten las especificaciones técnicas, tipo y cantidad a fin de que todo el material pedido, sea proporcionado por el proveedor.

Para evitar los daños mecánicos de los materiales de instalación en el campo es importante tener mucho cuidado en no dañarlos al momento de ser transportados puesto que los filtros, válvulas entre otros materiales son delicados y cualquier golpe podría ocasionar algún desperfecto. También se recomienda no caminar sobre la tubería al momento desenrollarla.

4.6.2.2. *Planos del diseño*

El diseño del sistema de riego debe tener los diferentes planos en los que conste los detalles constructivos del cabezal de control, salidas desde la principal, secundaria, salida de o de inserción de los goteros.

Es importante comparar las dimensiones reales del terreno, topografía, número y longitud de las hileras correspondientes en la superficie del terreno.

4.6.2.3. *Preparación del terreno*

Al momento de preparar el terreno se debe considerar:

La utilización de estacas y pintura para efectuar el replanteo con la estación total a fin de realizar el señalamiento de las líneas trazadas en el plano topográfico. Se delimitará las líneas por donde se dará paso a la red de distribución.

Una vez delimitada la trayectoria de la red hidráulica se procede a desbrozar y excavar las zanjas.

4.6.2.4. *Instalación de la tubería principal y cabezal de riego*

Para la tubería principal se recomienda la excavación de las zanjas de 0,60 m profundidad por 0,25 m, a fin de tener facilidad para la colocación de las tuberías. Posteriormente las zanjas deben ser rellenas y enterrada con el mismo material extraído.

El cabezal de control debe ubicarse en la parte inicial del sistema y debe constar con todos los elementos necesarios para que el productor pueda realizar eficientemente sus prácticas de riego, por lo cual la persona que va a instalar debe guiarse en el plano que debe presentar a detalle la ubicación de las válvulas, universales, codos, filtro, tubo Venturi, manómetros etc.

4.6.2.5. *Instalación de tuberías secundarias, terciarias y laterales*

Para las tuberías secundaria y terciaria se debe realizar la excavación de las zanjas de 0,4 m de alto y 0,2 m de ancho al igual que la tubería principal será rellena y enterrada con el mismo material extraído.

La tubería lateral estará descubierta y será extendida horizontalmente a lo largo de la superficie. En la tubería terciaria se debe realizar orificios en los que irán ubicados adaptadores para unir la tubería lateral.

Seguidamente en la tubería lateral a cada lado de la planta se incorporarán los goteros.

4.6.2.6. *Inspección de los componentes instalados*

Se debe realizar una inspección visual por todos los componentes del sistema de riego (tuberías, accesorios, cabezal, emisores entre otros) para lo cual se recomienda:

- Comprobar las presiones en los diferentes componentes del Sistema.

- Se debe evidenciar que los goteros sean idénticos en marca, modelo, tipo, que las tuberías cumplan con las especificaciones de diseño (diámetro, presiones y accesorios).
- Comprobar la estanqueidad del sistema en las redes: primaria, secundaria y terciaria.
- Observar si hay presencia de fugas en las tuberías, elementos de conexión o válvulas de riego.
- Se realizar un lavado o purga del cabezal y de las tuberías, hasta que el agua salga clara asegurándose de sacar hacia fuera todos los cortes plásticos, piedras, tierra, etc.

4.6.3. Consideraciones generales del sistema de riego por goteo

Las consideraciones generales más importantes del sistema riego por goteo, se enlistan a continuación:

- La fuente abastecedora de agua es un tanque reservorio abierto de 200 m³ a este tanque se le provee de agua mediante un canal rectangular de hormigón simple.
- El Sistema de riego a ser instalado, aprovecha la diferencia de altitud que va desde la cota 964 m s.n.m. en la que se encuentra ubicado el reservorio y la cota 943 m s.n.m. en la que empieza el sistema de riego (21 metros).
- La red de distribución y aplicación de riego está diseñada con tubería PVC y polietileno, tubería que es susceptible a fracturas cuando se encuentran sometidas a esfuerzos extremos por lo cual es necesario tener cuidado cuando se realicen las labores agrícolas.

4.6.4. Mantenimiento de los equipos de riego

El sistema de riego debe ser inspeccionado periódicamente a fin de evitar taponamientos de los goteros y rotura en la tubería.

Se recomienda realizar inspecciones periódicas cada 15 días para garantizar la vida útil de los goteros, así mismo se debe cuidar o revisar los filtros, se debe observar el color del agua al final de los laterales y los emisores. El agua blanca indica presencia de carbonatos, de color marrón presencia de hierro y las obstrucciones por microorganismos presentan un color grasiento de color negro.

Un programa de mantenimiento debe considerar: filtros, inyectoros, válvulas, goteros, laterales y tuberías.

4.6.4.1. Filtros

Dentro del control o cabezal de riego se encuentran los filtros. Deben ser desmontados al final de cada temporada de con el fin de observar desgastes de las paredes interiores. Para desmontar el filtro se debe retirar la carcasa de sujeción del filtro de la parte de abajo y se desenrosca girando en contra de las manecillas del reloj, se retira el cartucho colector que contiene las anillas y se las limpia con un cepillo de cerdas suaves o con una manguera a presión. Una vez realizada la limpieza se vuelve a colocar el cartucho y se asegura la carcasa posteriormente se deja correr el agua.

Es importante observar los manómetros para conocer la diferencia de presión de entrada al cabezal y salida a la red hidráulica.

4.6.4.2. Inyector Venturi

Se debe revisar el funcionamiento antes de cada uso, para evitar la acumulación de compuestos bajo solubilidad en el fondo del tanque donde se prepare la solución. También se debe observar la presión del manómetro que se encuentra ubicado inicio y al final del cabezal para verificar que no haya algún cambio con la presión que funciona el sistema; es decir que, al aumentar la velocidad del fluido, disminuye su presión de forma proporcional.

4.6.4.3. Red hidráulica y emisores

La red hidráulica es el conjunto de tuberías que distribuyen y conducen el agua desde el reservorio hasta la aplicación a la planta, lo constituyen las tuberías: principal o de abastecimiento, secundaria, terciaria, laterales. Por lo cual se propone:

- Revisar periódicamente la red de tubería a fin de identificar cortaduras, fugas de agua en tubería o conexiones.
- Se debe realizar una inspección visual de las conducciones de polietileno (laterales), la revisión debe ser minuciosa a fin de evitar desprendimientos de los emisores que pueden ocasionar pérdidas de agua, distribución del riego sin uniformidad y pérdidas de presión.
- Purgar luego de cada temporada de riego, quitando la tapa al final de la red hidráulica y haciendo circular el agua para expulsar cualquier impureza.
- Es importante recalcar la purga de toda la tubería.

4.6.4.4. Trabajos en el terreno

- Cuando se realice labores de limpieza y deshierbe se debe levantar la tubería lateral de manera cuidadosa.
- Con ayuda del plano se debe tener en cuenta el recorrido de la tubería que se encuentra enterrada a fin de evitar posibles daños.
- El cabezal y tuberías principales deben estar libres de malezas.

4.6.5. Operación del sistema de riego por goteo

El sistema deberá ser operado de la siguiente manera:

4.6.5.1. Turnos de operación

La programación del riego se efectuó en base al caudal de riego ($0,80 \text{ l s}^{-1}$), se regarán las tres válvulas en tiempos diferentes para reponer una lámina de $5,5 \text{ mm día}^{-1}$, con un tiempo de 2 horas y una frecuencia de 1 día.

El riego se realizará de lunes a domingo; abriendo la válvula 1 de 07H00 am – 09H00 am; la válvula 2 de 10H00 am – 12H00; y, la válvula 3 de 12H00 – 14H00 pm.

Cada riego será de acuerdo con la etapa en la cual se encuentre el cultivo, todo esto deberá considerarse de acuerdo con Tabla 12, correspondiente a los requerimientos de riego. El operador deberá realizar un programa de acuerdo a la etapa de desarrollo, evapotranspiración del cultivo en el cual los tiempos y frecuencias irán cambiando dependiendo de las necesidades hídricas y de las condiciones climáticas.

5. CONCLUSIONES

- La textura del suelo para el primero y segundo horizontes fueron arcilloso y franco arcilloso, en su orden; mientras que la densidad aparente en el mismo orden fue de $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,52 \text{ g cm}^{-3}$.
- Los contenidos de humedad en términos de volumen a diferentes tensiones para los dos primeros horizontes fueron: 50,6 y 45,2 % θ_v saturación; capacidad de campo 36,9 y 34,8 % θ_v ; y, punto de marchitez permanente: 31,3 y 30,4 % θ_v .
- La evaluación física del suelo fue de muy pobre
- Los mayores requerimientos brutos de riego le correspondieron al mes de septiembre con $4,1 \text{ mm día}^{-1}$; mientras que el menor fue para el mes de mayo con $1,70 \text{ mm día}^{-1}$.
- Las necesidades totales de riego fueron de $13,25 \text{ litros día}^{-1} \text{ planta}^{-1}$.
- El tiempo de riego del sistema es de 2 horas y su frecuencia es de 1 día
- El caudal de cada subunidad de riego es de $0,27 \text{ l s}^{-1}$; mientras que el caudal de diseño de todo el sistema es de $0,80 \text{ l s}^{-1}$.
- La presión máxima en la subunidad de riego se produjo al final del lateral (10,7 m); en tanto que la presión mínima (9,8 m) se generó al inicio del lateral.
- La variación del caudal en la subunidad de riego es de 4,8 %; mientras que la variación de presión en la misma subunidad es de 8,5 %.
- La carga total que requiere el sistema para su funcionamiento es de 19 metros.
- La carga disponible por diferencia de nivel topográfica entre el reservorio y la parcela de riego es de 21 metros.
- El presupuesto total del sistema de riego por goteo es de \$ 1 235,34

6. RECOMENDACIONES

En función de los resultados obtenidos y conclusiones generadas, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Una vez instalado el sistema de riego por goteo se debe evaluar los coeficientes de uniformidad de aplicación de agua en el suelo y de distribución para comprobar si el sistema está funcionando adecuadamente.
- Para mejorar las condiciones de textura, humedad y aireación en el sitio de estudio se debe adicionar materia orgánica y abonos naturales.
- De acuerdo a los manómetros ubicados en el cabezal de control se debe hacer la comprobación de la presión del sistema.
- Para que la presión de entrada en cada subunidad no varíe durante la operación de riego, es necesario instalar un regulador de presión en cada subunidad de riego.
- Se recomienda instalar una estación meteorológica que permita, disponer de información climática a fin de programar el riego de los cultivos en el centro binacional técnica Zapotepamba y sus alrededores.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J. (2012). Implementación de un banco de germoplasma nativo en el Centro Binacional de Formación Técnica – Zapotepamba, en alianza con los colegios técnicos agropecuarios asentados en el lado ecuatoriano de la cuenca binacional Catamayo Chira. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5590/1/Abad%20Criollo%20Jos%c3%a9.pdf>
- Aguinsaca, D. (2020). Diseño, instalación y evaluación de un sistema de riego por goteo y microaspersión en el predio “La Dolorosa” de la parroquia Chuquiribamba, cantón y provincia de Loja. Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/23303/1/Diana%20Elizabeth%20Aguinsaca%20Medina.pdf>
- Alburquerque, J. (2015). Determinación del coeficiente de cultivo kc para frejol *phaseolus vulgaris* bajo invernadero en la granja Santa Inés (Bachelor's thesis, Machala: Universidad Técnica de Machala). Recuperado de: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/3022>
- Alfaro, I., y Nomberto, P. (2015). Diseño de un sistema de riego por goteo para el cultivo de café en el sector Quebradonda Catache Santa Cruz Cajamarca. Tesis de grado. Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”. Lambayeque, Perú. Recuperado de: <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/103/BC-TES-3809.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ahmad, S. y Ajaz, A. (2013). Design and operations manual pressurized irrigation systems. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/326379761>
- Arias, L. (2018). Propuesta de mejoramiento en el manejo del cultivo de café en el barrio Cango Viejo parroquia Mercadillo cantón Puyango. Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja, Unidad de Educación a Distancia. Loja Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/20854/1/LUIS%20DAVID%20ARIAS%20VILLAVICENCIO.pdf>

- Amer, K., Gomaa, A., Wasif, E. y Eslam, Y. (2017). Designing and evaluating trickle irrigation system using two emitter types. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/313563480_DESIGNING_AND_EVALUATING_TRICKLE_IRRIGATION_SYSTEM_USING_TWO_EMITTER_TYPES
- Andrades, M., Moliner, A., y Maasaguer, A. (2015). Prácticas de edafología. Métodos didácticos para análisis de suelos. Universidad de la Rioja. Servicio de publicaciones. Recuperado de: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-PracticasDeEdafologia-580696.pdf>
- Angella, G., Frías, C., y Salgado, R. (2016). Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta. INTA. Buenos Aires-Argentina. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua_suelo_planta.pdf
- Arroyo, M. (2020). El Riego Inteligente en la Agricultura. Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/manuel-martin-arroyo/riego-inteligente-agricultura>
- Assan, M., y Gorosito, S. (2018). Relación agua suelo planta. Serie Didáctica N° 1 Catedra de Riego y Drenaje FCA UNCA. Recuperado de: <http://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CUADERNOS%20DE%20CATEDRA/Guia%20didactica%20RASPAS%20Assan.pdf>
- Arroyo M. (2019). El riego inteligente en la agricultura. Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/manuel-martin-arroyo/riego-inteligente-agricultura>
- Blanca, v., Langa, J., y Inmaculada, M. (2014). Mantenimiento de redes de distribución de agua y saneamiento. España: Paraninfo S.A. Recuperado de: https://www.paraninfo.es/catalogo/9788428399685/mf0609_2---mantenimiento-de-redes-de-distribucion-de-agua-y-saneamiento
- Basso, C., Villafañe, G., y Villafañe, R. (2016). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo (kc) de Stevia bajo condiciones parcialmente protegidas. BIOAGRO, 28(2), 131–136. Recuperado de: http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-33612016000200008&script=sci_abstract
- Banegas, K. (2009). Identificación de las fuentes de variación que tienen efecto sobre la calidad de café (*Coffea arabica* L.) en los municipios de El Paraíso y Alauca, Honduras.

- (Posgrado). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Escuela de Posgrado. Turrialba, Costa Rica. Recuperado de: https://agritrop.cirad.fr/556129/1/document_556129.pdf
- Bote, A., Ayalew, B., Ocho, L., Anten, P., y Vos, J. (2018). Analysis of coffee (*Coffea Arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 92, 115-122. Recuperado de: <https://research.wur.nl/en/publications/analysis-of-coffee-coffea-arabica-l-performance-in-relation-to-ra-2>
- Burneo, J. (2018). Diseño de un sistema de riego por goteo para parcelas de uva en la Hacienda Agrindzap, ubicada en el cantón Zapotillo, provincia de Loja. Tesis de grado. Universidad San Francisco de Quito USFQ. Quito, Ecuador. Recuperado de: <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7510/1/139399.pdf>
- Cadena, V. (2017). Hablemos de riego. (Segunda ed). Quito, Ecuador: CONGOPE. Recuperado de: <http://www.congope.gob.ec/wp-content/uploads/2017/03/HABLEMOS-DE-RIEGO-LOW.pdf>
- Cadena, V. (2014). Diseños de Riego, UCE, Ecuador.
- Callejas, R., J. Vera, y C. Kremer. 2014. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Serie Ciencias Agronómicas 23. Santiago-Chile. Recuperado: https://isbn.cloud/9789561908932/riego-de-precision-en-frutales-con-sensores-de-suelo/#google_vignette
- Castillo, J. (2020). Mejoramiento del sistema de riego por aspersion en café, en el barrio La Era, parroquia El Tambo, cantón Catamayo, provincia de Loja. Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja UNL. Loja, Ecuador. Recuperado de: https://dspace.unl.edu.ec:9001/jspui/bitstream/123456789/23314/1/Jenniffer_Elizabet_h_Castillo_Vega...pdf
- Calvache, M. (2012). Riego Andino Tecnificado. Editorial Universitaria. Quito. Ecuador. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Angel-Calvache-Ulloa/publication/337484474_RIEGO_ANDINO_TECNIFICADO_PARA_FERTIR

RIEGO/links/5ddb307d92851c1fedaf59e9/RIEGO-ANDINO-TECNIFICADO-PARA-FERTIRRIEGO.pdf

Castro, E. (2016). Sistema de control electrónico de plagas, calefacción y regadío en las plantaciones de mora ubicadas en la provincia de Tungurahua, parroquia Huachi Grande, sector “El Arbolito”. Tesis de grado. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. Recuperado de: https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/20349/1/Tesis_t1109ec.pdf

Chanatasig, R. (2017). Diseño de un sistema eficiente de bombeo, utilizando la fuerza hidráulica del agua generando carga artificial para utilizar en riego por goteo en el cultivo de alimentos y siembra de árboles frutales en las riveras del río Yanayacu del Cantón Latacunga (Posgrado). Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6525/1/MUTC-000579.pdf>

Chamba, E. (2018). Efecto de cuatro niveles de sombra en el desarrollo vegetativo del café (Coffea arabica L.) en sistemas agroforestales de la Hacienda Cristal del cantón Loja Tesis de grado. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/21121/1/Estefania%20Gabriela%20Chamba%20Qui%C3%B1onez.pdf>

Corley, R., y Tinker, P. (2009). La palma de aceite. Trad. Por Maldonado, E.; Maldonado F. 4 ed. Santa Fé de Bogotá, CO. Molher Impresores. 604 p

Corporación de desarrollo indígena CONADI, (2017). Como determinar cómo y cuándo regar. Gobierno de Chile. Copiapó. Chile. Recuperado de: http://www.gea.uchile.cl/archivos/Como_determinar_cuando_y_cuanto_regar_Conadi.pdf

Demin, E. (2014). Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego. Métodos de riego: Fundamentos, usos y adaptaciones. Ediciones INTA. Catamarca, Argentina. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_aportes_para_el_mejoramiento_del_manejo_de_los_sistemas_de_riego.pdf

- Duran, M. (2008). Filtración y uniformidad de riego en los sistemas de microirrigación con efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales. Recuperado de: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/8157/Tmdr1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Duicela, L. y Velásquez, S. y Farfán, D. (2017). Calidad Organoléptica de cafés Arábigos en Relación a las Variedades y Altitudes de las Zonas de Cultivo, Ecuador. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. 18 (1). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/813/81351597010.pdf>
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2012). Agua: clave de la seguridad alimentaria. Recuperado de: <http://www.fao.org/news/story/es/item/87009/icode/?fbclid=IwAR1r0CRHeOlvyqRVGi9rn6Mf1r8HdVkf4iX5YqbEQAzlvreK5VB9JNAtRJY>
- Fernandez, J. (2010). Manual de riego para agricultores: módulo 4. Riego localizado: manual y ejercicios. Sevilla: Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Recuperado de: <https://documen./documents/manual-de-riego-para-agricultores-modulos-i-ii-iii-iv.htmlt>
- Fernández., J. (2011). Diseño de un parque periurbano en el paraje de "Las Salinas" perteneciente al T.M. de Roquetas de Mar (Almería). (Tesis de grado). Universidad de Almería. Andalucía, España. Recuperado de: <http://repositorio.ual.es/handle/10835/567>
- Figueroa, E., Pérez, F. y Godínez, L. (sf). Producción y consumo del café ECORFAN®. Recuperado de: https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf
- Franco, A (2018). Evaluación de la eficiencia del método de riego. Tesis de grado. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Recuperado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27290/1/Tesis-191%20%20Ingenier%C3%ADa%20Agron%C3%B3mica%20-CD%20563.pdf>

- Franquet, B, y Josep, M. (2019). Coeficiente reductor de Christiansen. Diseño de un riego por aspersión. Recuperado de: https://www2.uned.es/ca-tortosa/Biblioteca_Digital/Biblio/JM_Franquet/Riego_Aspersion.pdf
- Ferreya, E., G. Sellés. 2013. Manual de riego para frutales: uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar períodos de escasez. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centros Regionales de Investigación La Platina. Boletín INIA N° 278. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/7681>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., y Bendix, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorología*, 152, 17-30. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/257018968_Near_surface_air_humidity_in_a_megadiverse_Andean_mountain_ecosystem_of_southern_Ecuador_and_its_regionalization
- Gallegos, C. (2016). Diseño e implementación de un sistema de riego presurizado para pastos en la finca Landapo de la parroquia Lauro Guerrero, Cantón Paltas, Provincia de Loja. Universidad Nacional de Loja. Loja. Ecuador. Recuperado de: https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12733/1/CRISTIAN_PEDRO_GALLEGOS_D%c3%8dAZ.pdf
- García, M., y Puppo, L. (2015). Agro ciencia: revista científica de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2014.07.010>
- Gómez, G., Cerrón, R., Capcha, T., y Villavicencio, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 4(2), 8. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5042935.pdf>
- González, E. (2018). Evaluación de un sistema de riego por goteo bajo condiciones de hidroponía en el cultivo de pimiento morrón “*Capsicum annum*”. (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila. México. Recuperado de: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/43080/K%20652>

88%20Gonz%C3%A1lez%20Gonz%C3%A1lez%20Enedel%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Goyal, M., y Aladakatti, B (Eds.). (2018). Engineering Interventions in Sustainable Trickle Irrigation: Irrigation Requirements and Uniformity, Fertigation, and Crop Performance. CRC PRESS. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Jayakumar_Manickam2/publication/343962496_Engineering_Interventions_in_Sustainable_Trickle_Irrigation_Author_copy/links/5f59fd784585154dbbc41837/Engineering-Interventions-in-Sustainable-Trickle-Irrigation-Author-copy.pdf

Holdridge, L. (1967). Life zone ecology. San José, Costa Rica: Tropical Science Center. 2006 p. Recuperado de: http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/holdridge_1966_-_life_zone_ecology.pdf

Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE), (2011). Guía Técnica para el Cultivo del Café. (Primera edición). Costa Rica: ICAFE-CICAFE. Recuperado de: <http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/GUIA-TECNICA-V10.pdf>

Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura INTAGRI (2017). Fundamentos para un Diseño Eficiente del Sistema. Agua y Riego. Recuperado de: https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/sistema-de-riego-por-goteo?fbclid=IwAR3ChD7ebk5oSCFEmLzD7knvNyvaSAvFfZByBry68jSyAxG_VNí6rlejRfc

International Development Enterprises (IDI). (2015). Technical manual for affordable micro irrigation technology. Recuperado de: <http://www.siminet.org/images/pdfs/technical-manual.pdf>

Irrigation National Engineering Handbook. (INEH). (2013). Chapter 7 Microirrigation. Recuperado de: <https://directives.sc.gov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=34517.wba>.

Jiménez, S. (2015). Componentes de los sistemas de riego por goteo. Recuperado de: <https://www.hidraulicafacil.com/2015/08/riegoporgoteo.html>

- Jiménez, S. (2015). Diseño hidráulico de la línea lateral de un sistema de riego localizado. Recuperado de: <https://www.hidraulicafacil.com/2015/09/diseniolateral.html>
- Jiménez, R. (2019). Diseño, implementación y evaluación de un sistema de riego por aspersión utilizando un equipo motobomba en la Finca San José. Tesis de grado. Loja, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22595/1/Robinson%20Andr%c3%a9s%20Jim%c3%a9nez%20Cumbicus.pdf>
- Kirkham, M. (2014). Principles of soil and plant water relations. Academic Press. Recuperado de: [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=Y5r8AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=P1&dq=Kirkham,+M.+\(2014\).+Principles+of+soil+and+plant+water+relations.+Academic+Press.&ots=kbqbD2yeus&sig=CTk-ioyEswZQbHz0rg96yzlk43k#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=Y5r8AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=P1&dq=Kirkham,+M.+(2014).+Principles+of+soil+and+plant+water+relations.+Academic+Press.&ots=kbqbD2yeus&sig=CTk-ioyEswZQbHz0rg96yzlk43k#v=onepage&q&f=false)
- Keshtgasr, A. (2012). Optimum Design of Drip Irrigation System using Microtubes as Emitters. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/15625002.pdf>
- Keller y Karmeli (1974). Trickle irrigation design parameters. Recuperado de: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAA949.pdf
- Lambert, B., Lewis, R., Virgil, Q. (2016). Applied Soil Physical Properties, Drainage, and Irrigation Strategies. New York, USA: Springer. Recuperado de: <https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-319-24226-2%2F1.pdf>
- Liotta, M. (2015). Manual de capacitación: riego por goteo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Rivadavia, Argentina. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf
- Martínez, J. (2014). Introducción al riego. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. España.
- Maza, H. (2020). Evaluación y mejoramiento técnico de la eficiencia de riego presurizado en el cultivo de café en el sector potrerillos, cantón Gonzanamá. Tesis de grado. Loja, Ecuador. Recuperado de:

<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22976/1/Henry%20Rene%20Maza%20Buele.pdf>.

Mendoza, A. (2013). Riego por goteo. El Salvador. Recuperado de: <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/riego/Riego%20por%20goteo.pdf>

Mendoza, J. y Bermúdez, J. (2015). Diseño, implementación y evaluación de un sistema de riego por microaspersión en café (*Coffea arábica* L.) en la ESPAM MFL (tesis de grado). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Recuperado de: <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/456/1/TA50.pdf>

Megh, R. y Goyal, L. (2010). Manejo de Riego por Goteo. Dr. Ingeniería Agrícola y Biomédica, primera edición, Universidad Puerto Rico – Reciento de Mayagüez. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/19349212/Riego-Por-Goteo-Libro-Portada-1>

Memon, A. y Jamsa, S. (2018). Crop Water Requirement and Irrigation scheduling of Soybean and Tomato crop using CROPWAT 8.0. International Research Journal of Engineering and Technology, 5(9), 669-71. Recuperado de: <https://www.irjet.net/archives/V5/i9/IRJET-V5I9121.pdf>

Merino, G. (2014). Diseño y evaluación de un dispositivo de riego a presión, adaptado a las condiciones del pequeño productor agropecuario de la comunidad las Huertas. Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/20266/1/tesis%20final.pdf>

Moratiel, Y. (2017). Riego en cultivos: fundamentos y manejo. Madrid, España. Mundo-Prensa. Recuperado de: <https://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484767268/riego-en-cultivos--fundamentos-y-manejo>

Monge, M (2018). Presiones de diseño en unidades de riego por goteo. Recuperado de: <https://www.hutech.es/single-post/2018/12/15/presiones-de-dise-c3-b1o-en-unidades-de-riego-por-goteo>

Novillo, D., Carrillo, M., Cargua, J., Moreira, V., Albán, K y Morales, F. (2018). Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador.

- Temas agrarios. Recuperado de:
<https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/1301/1569>
- Ojeda., A. Leod., C. Águila., K y Pino., M. (2018). Bases para la determinación de las necesidades hídricas del cultivo del calafate *in situ*, para su adaptación al manejo agronómico. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Punta Arenas, Chile. Recuperado de:
<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/4880/Informativo%20INIA%20N%20c%20b%2079?sequence=1&isAllowed=y>
- Olguín Pringles, A. (2016). Evaluación Integral de Desempeño del método de riego por goteo en Vid (*Vitisvinifera*L.), en la zona este y norte del Oasis de Tulum, San Juan Argentina . Recuperado de:
https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/6136/INTA_CRMendozaSanJuan_EEASanJuan_OlguinPringles_A_Evaluacion_integral_del_desempe%3%Bl0_del_metodo_de_riego.pdf?sequence=1&isAllowed=n
- Ortiz, A. (2017). Variabilidad espacial de las constantes hidrofísicas del suelo en el sistema de riego" Campana - Malacatos". Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. Recuperado de:
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/18425/1/Harry%20Anderson%20Ort%3%ADz%20Villavicencio.pdf>
- Ortíz, R. (2020). Riego por goteo. Diseño agronómico e hidráulico Recuperado de:
<https://www.researchgate.net/publication/344875653>
- Paches, G., Maria, A. (2019). El agua en el suelo. Fuerzas de retención. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/121154/Pach%3%A9s%20-%20El%20agua%20en%20el%20suelo.%20Fuerzas%20de%20retenci%3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pastor., P. (2019). Diseño de una instalación de regadío para una plantación de Trufa en Albentosa (Teruel). Tesis de grado. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia - España. Recuperado de: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Pastor%20-%20DISE%3%91O%20DE%20UNA%20INSTALACI%3%93N%20DE%20REG>

AD%C3%8DO%20PARA%20UNA%20PLANTACI%C3%93N%20DE%20TRUFA
%20NEGRA%20EN%20ALBENTOSA%20(TE....pdf

Pizarro, F. 1990. Riegos Localizados de Alta Frecuencia (RLAF). Goteo, Micro aspersión. valareEdiciones Mundi Prensa. Tercera Edición. Madrid. España.

Porta, J., López, M., y Poch, R. (2014). Edafología: uso y protección de suelos. Cataluña. España. Mundi-Prensa Libros. Recuperado de:
file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/9788484767503.pdf

Rain Bird. (2010). Uniformidad de la distribución en riego por aspersión. Recuperado de:
https://www.rainbird.com/documents/ag/L387_DistributionUniformity_es.pdf

Reindres, F., Grové, B., Benadé, N., Stoep I. y Niekerk, A. (2012). Technical aspects and cost estimating procedures of surface and subsurface drip irrigation systems. Recuperado de: <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT%20525-12.pdf>

Sarango, A. (2019). Evaluación del Sistema de riego por goteo en la finca Shagindo de la parroquia San Pedro de la Bendita. Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja, Loja. Recuperado de:
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/22691/1/ANTHONY%20DANIEL%20SARANGO%20CALVA.pdf>

Servín Palestina, M., Tijerina Chávez, L., Medina García, G., Palacios Velez, O., y Flores Magdaleno, H. (2017). Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 8(2), 423-430. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/2631/263150548014.pdf>

Silva, P., Silva, H., Garrido, M., Y Acevedo, E. (2015). Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. Departamento de Producción Agrícola, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. Recuperado de:
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130642/Manual-de-estudio-y-ejercicios-relacionados-con-el-contenido-de-agua.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Shirbeny, M., Badr, M., y Bauomy, M. (2014). Assessment of wheat crop coefficient using remote sensing techniques. *World Research Journal of Agricultural Sciences*, 1(2), 12–16
- Solórzano, E., Vega, M.; Defaz, G., Solórzano, M. (2015). Implementación de un sistema de riego por aspersión para uso agrícola, ubicado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Agrícola en la parroquia Lodana del cantón Santa Ana. Tesis de grado. Manabí, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.utm.edu.ec/handle/123456789/743>
- Sotomayor, I. (1993). Manual del cultivo del café. Estación experimental tropical Pichilingue. Quevedo – Ecuador.
- Torres, A. (2013). Manual de Riego. Mantenimiento de un sistema de riego por goteo. Recuperado de: <http://sb.uta.cl/libros/30924-MANUAL%20RIEGO%20web.pdf>
- Torres, I. (2016). “Respuesta del cultivo de maní (*Arachis Hipogea L.*) a dos métodos de riego a presión en el valle de Casanga, provincia de Loja”. Tesis de grado. Universidad Nacional de Loja UNL. Loja, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/10303/1/Torres%20Italo%20Tesis.pdf>
- Turégano, J. (2014). Modelización del comportamiento hidráulico de una subunidad de riego localizado (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. Recuperado de: <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/39354/Turegano%20-%20Modelizaci%C3%B3n%20del%20comportamiento%20hidr%C3%A1ulico%20de%20una%20subunidad%20de%20riego%20localizado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vanegas, F. (2016). Conoce el clima óptimo para un cultivo de café. Coffea- Marketing. Recuperado de: <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/08/31/conoce-el-clima-optimo-para-un-cultivo-de-cafe/>
- Valarezo, C., Iñiguez, M., Valarezo, L. y Guaya, P. (1998). Condiciones Físicas de los Suelos de la Región Sur del Ecuador. Una Guía para Proyectos de Riego y Drenaje, Manejo y Conservación de Suelos. Loja, Ecuador.

- Valarezo, C., Guya, P., Valarezo, L. (2007). Estudio de Edafología del Centro Binacional de Técnico Zapotepamba.
- Valarezo, L., Valarezo, C., Mancino, M. (2020). Producción Agropecuaria Sostenible en Suelos Arcillosos del Piso Templado Andino del Sur del Ecuador.
- Villacís, P., y Aguilar, T. (2016). Comportamiento agronómico de cinco variedades de café (*coffea arábica* L.), sometido a diferentes aplicaciones foliares. Tesis de grado. Universidad de las Fuerzas Armadas, Santo Domingo de Tsáchilas, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11296/1/T-ESPE-002795.pdf>
- Villalobos. (2015). Riego a Presión y Goteo, Costa Rica.
- Waller, P., y Yitayew, M. (2016). Irrigation and drainage engineering. Springer, Heidelberg. Recuperado de: [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=h2f_CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Waller,+P.,+y+Yitayew,+M.+\(2016\).+Irrigation+and+drainage+engineering.&ots=2mJvnO4Mea&sig=Pw6tYiZnVpLROT2hEh5wQjheQpg#v=onepage&q=Waller%2C%20P.%2C%20y%20Yitayew%2C%20M.%20\(2016\).%20Irrigation%20and%20drainage%20engineering.&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=h2f_CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Waller,+P.,+y+Yitayew,+M.+(2016).+Irrigation+and+drainage+engineering.&ots=2mJvnO4Mea&sig=Pw6tYiZnVpLROT2hEh5wQjheQpg#v=onepage&q=Waller%2C%20P.%2C%20y%20Yitayew%2C%20M.%20(2016).%20Irrigation%20and%20drainage%20engineering.&f=false)
- Yugueros, R. (2017). Riego en cultivos: fundamentos y manejo. Mundi- Prensa Libros. Madrid. España. Recuperado de: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/9788484767268.pdf>.
- Zhang, B., Liu, Y., Xu, D., Zhao, N., Lei, B., Rosa, R. D., y others. (2013). The dualcrop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat–summer maize crop sequence in North China Plain. *Irrigation Science*, 31(6), 1303–1316. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0405-1>
- Zotarelli, L., Dukes, G., Liu, G., Simonne, E., y Agehara, S. (2019). Principles and Practices of Irrigation Management for Vegetables. En University of Florida (Ed). *Nutrient Management of Vegetable and Row Crops Handbook*. (pp. 152-160). Florida, USA: Vegetable Production Handbook of Florida.

8. ANEXOS

Anexo 1. Descripción de perfiles de la unidad de suelo del sector Centro Binacional Técnico Zapotepamba del Perfil 1 (P1Z).

Código: P1Z. **Fecha:** 20/02/2020 **Autor:** Carlos Valarezo, Miguel Villamagua, y Danny Picoita. **sitio:** Zapotepamba.

Altitud: 2.071m.s.n.m. **Coordenadas** 635162 E 9552772N. **Pendiente:** 5 %.

Paisaje: montaña; **Tipo de relieve:** terraza; **Forma del Terreno:** pie de pendiente.

Uso Actual o cobertura vegetal: Bosquete de vegetación secundaria dominada por el faique (*Acacia macracantha*)

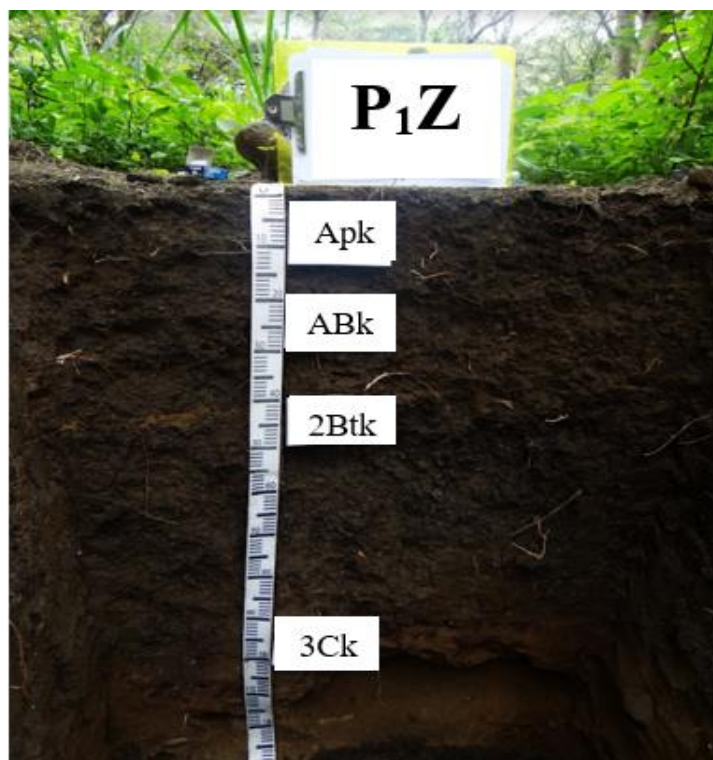
Condiciones de Humedad: Húmedo; seco 40 cm a 90 más **Pedregosidad superficial:** 0 %; **Tamaño:** 0 cm.

Afloramientos rocosos: No **Tipo:** No **Material parental:** coluvial- aluvial.

Profundidad de la capa freática: profundidad: 0 cm; fluctuación: 0cm

Presencia de Sales o Alcalis: No; **Drenaje:** bueno

Clasificación taxonómica preliminar USDA (2006): Kandiodults



DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PERFIL (P1Z).

Suelo muy profundo formado por tres depósitos secuenciales diferentes el depósito más reciente tiene un espesor 40 cm en el cual se ha diferenciado un horizonte (Ap.) y (ABk.), el intermedio tiene 50 cm de espesor y se lo ha denominado (2Bt) con fuerte estructura blocosa. El depósito más antiguo corresponde (23°C) mineralógicamente.

El suelo es bien drenado las raíces muy finas muy pocas se encuentran 100 cm de profundidad que atraviesan a través de las fisuras presenta a lo largo de las fisuras 5 mm de ancho, son más abundantes las raíces en el (Ap) y (ABk).

Fuerte efervescencia (reacción del ácido clorhídrico) lo que indica una elevada presencia de carbonato de calcio en todo el perfil.

Descripción individual de los horizontes o capas P1Z:

Apk 00 - 20 cm	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; arcillo limoso al tacto; grado fuerte; bloques subangulares gruesos, moderadamente desarrollados; muy adherente, plástico, firme en húmedo; sin presencia de poros; raíces finas pocas; límite gradual y plano.
ABk 20 - 40 cm	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; franco arcilloso limoso al tacto; grado fuerte; bloques subangulares medios, moderadamente desarrollados; muy adherente, plástico, fiable en húmedo; sin presencia de poros; raíces pocas, finas; límite neto y plano.
2Btk 40 - 90 cm	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; arcilloso al tacto; grado fuerte; bloques angulares, gruesos y medios, moderadamente desarrollados; muy adherente, muy plástico y muy duro en seco; sin presencia de poros; raíces muy pocas, muy finas; límite brusco y plano.
3Ck 90 - 120 cm	Pardo amarillento oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco arcilloso al tacto; grado suelto, moderadamente desarrollados; ligeramente adherente, ligeramente plástico, muy friable en húmedo; sin presencia de poros; raíces muy pocas, muy finas; piedras más de 50 cm.

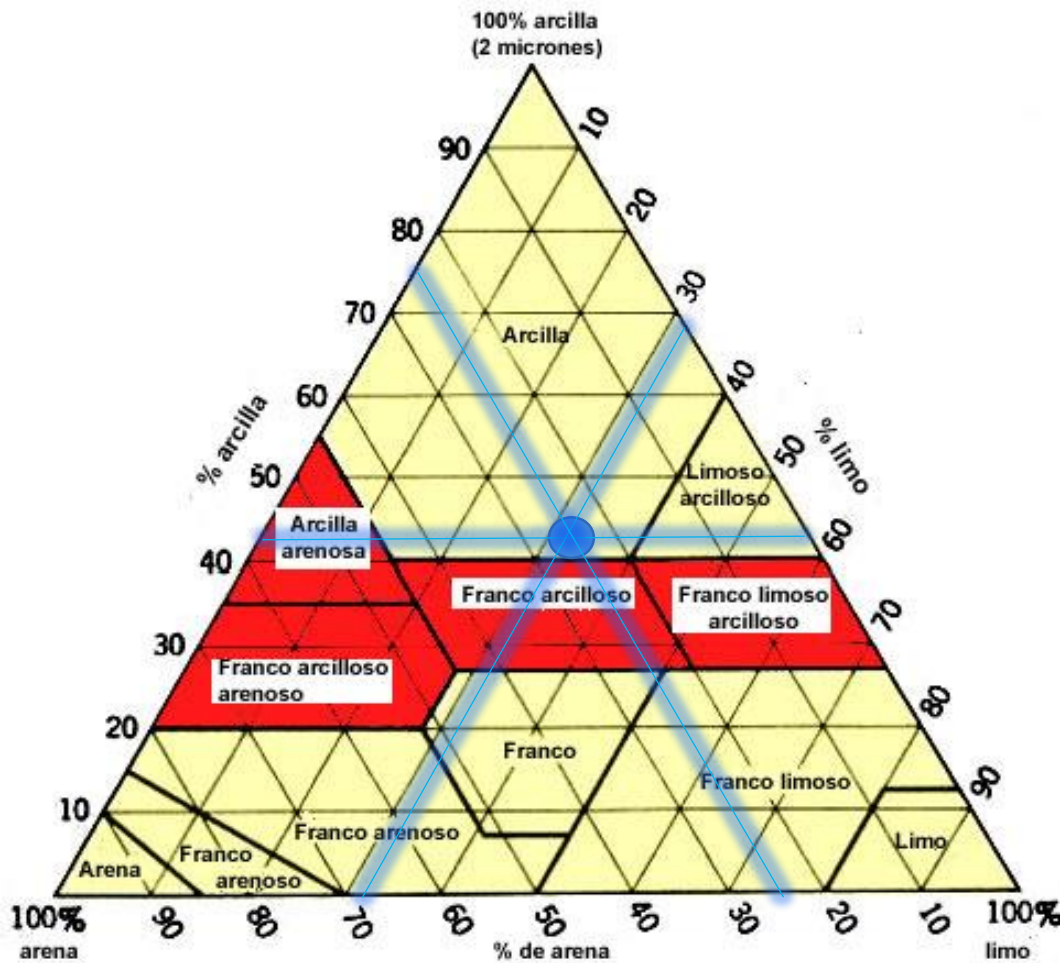
Anexo 2. Determinación de la textura del suelo.

ARCILLA

Arena	Arcilla	Limo
Primer Horizonte (00 - 20 cm)		
<hr/>		
$A_o = 100 - (1^{era}.L_c \times 2)$	$A_c = 2^{da}.L_c \times 2)$	$Lo = 100 - (\%Ac + \%Ao)$
$A_o = 100 - (36,36 \times 2)$	$A_c = (20,36 \times 2)$	$Lo = 100 - (41 + 27,3)$
Ao = 27 %	Ac = 41 %	Lo = 32 %

FRANCO ARCILLOSO

Arena	Arcilla	Limo
Segundo Horizonte (20 - 40 cm)		
<hr/>		
$A_o = 100 - (1^{era}.L_c \times 2)$	$A_c = 2^{da}.L_c \times 2)$	$Lo = 100 - (\%Ac + \%Ao)$
$A_o = 100 - (31,36 \times 2)$	$A_c = (16,36 \times 2)$	$Lo = 100 - (37,3 + 32,8)$
Ao = 37 %	Ac = 33 %	Lo = 30 %



Fuente: Tomado de la USDA.

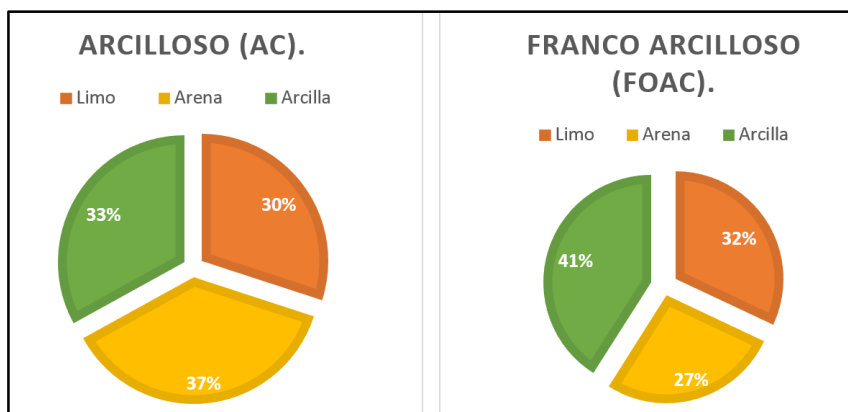


Figura 10. Clase textural y proporción de la fracción de suelo.

Fuente: Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Loja.

Anexo 3. Determinación de la evaluación de las condiciones físicas del suelo.

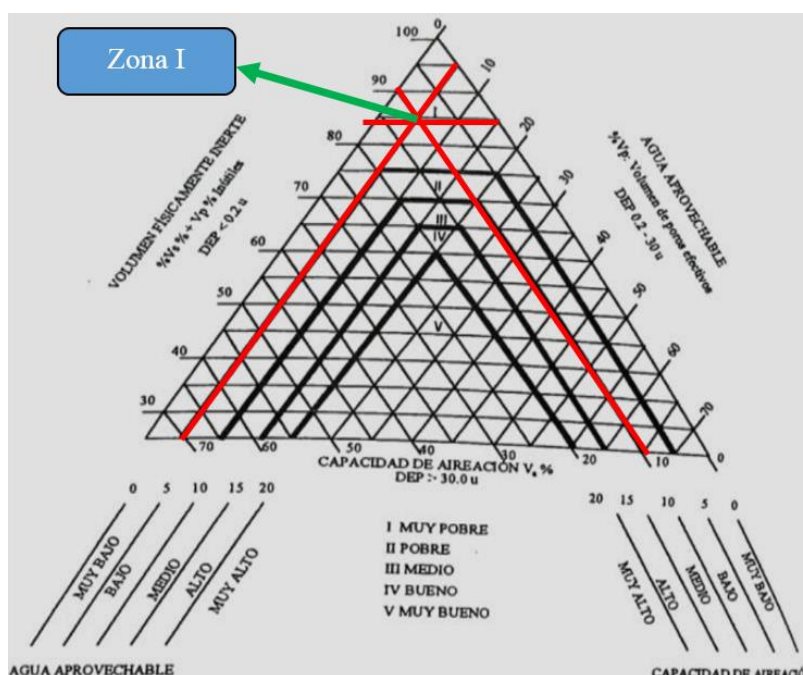


Figura 11. Diagrama triangulas para la evaluación de las condiciones físicas del suelo.

Fuente: Valarezo et al. 1998 (USDA)

Anexo 4. Resultados de las constantes hidrofísicas del suelo.

Los resultados de las constantes hidrofísicas del suelo fueron realizados en el “Laboratorio de suelos y aguas del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables”

Tabla 14. Textura y densidad del suelo.

Textura y densidad aparente del suelo						
Cód. Lab.	Profundidad	Análisis mecánico % TFS			Clasificación	Densidad Aparente g/cm ³
		Arena	Limo	Arcilla		
2451	0 – 20	27	41	32	Ac	1,35
2452	20 – 40	37	33	30	FoAc	1,52

Tabla 15. Contenidos de humedad (% θ_v) para los horizontes 0,0 – 20,0 y 20,0 – 40,0 cm de profundidad.

Textura	Saturación	CC 1/10 atm	CC 1/3 atm	PMP 15 atm	Agua aprovechable AA	Capacidad de aireación CA	Volumen total de sólidos VTS	Volumen físicamente inerte VFI
Ac	50,6	40,5	36,9	31,3	9,2	10	49,4	80,7
FoAc	45,17	38,4	34,8	30,4	8,0	6,8	54,8	85,2
PROMEDIO	47,9	39,5	35,9	30,8	8,6	8,4	52,1	83,0

CC = Capacidad de campo; PMP = Punto de marchitez permanente; Sat = saturación.

Agua aprovechable

$$AA = CC - PMP$$

$$AA = 35,9 \% \theta_v - 30,8 \% \theta_v$$

$$AA = 5,1 \% \theta_v$$

Capacidad de aireación

$$CA = Sat - CC$$

$$CA = 47,9 \% \theta_v - 35,9 \% \theta_v$$

$$CA = 12 \% \theta_v$$

Volumen total de poros

(Saturación = Volumen total de poros)

$$VTP = 47,9 \% \theta_v$$

Volumen total de sólidos

$$VTS = 100 - Sat$$

$$VTS = 100 - 47,9 \% \theta_v$$

$$VTS = 52,1 \% \theta_v$$

Volumen físicamente inerte

$$VFI = [100 - (VTP - PMP)]$$

$$VFI = [100 - (47,9 \% \theta_v - 30,8 \% \theta_v)]$$

$$VFI = 82,9 \% \theta_v$$

Anexo 5. Estaciones meteorológicas de estudio y correlaciones.

Tabla 16. Estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.

Estación			Ubicación geográfica		Altitud	Institución
Código	Nombre	Tipo	Latitud	Longitud	m s.n.m	Publica
M241	QUILANGA	CO	9554269	669905.2	1819	INAMHI
M151	ZAPOTILLO	CO	9521547	659527.8	223	INAMHI
M147	YANGANA	CO	9599619	696358.3	1835	INAMHI

Tabla 17. Datos meteorológicos de las estaciones Quilanga, Yangana y Zapotillo (período 1990-2015).

Estación	Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo	ETo
		°C	°C	%	km/día	Horas	MJ/m ² /día	mm/mes	mm/día
Quilanga (1819)	Enero	13.1	24.6	86	173.0	8.0	21.8	122.96	3.97
	Febrero	13.2	24.0	86	173.0	7.5	21.5	108.76	3.88
	Marzo	13.2	24.2	87	173.0	7.6	21.4	119.46	3.85
	Abril	13.2	24.2	86	173.0	7.5	20.3	109.88	3.66
	Mayo	13.0	24.3	84	173.0	7.6	19.0	107.49	3.47
	Junio	12.7	24.1	82	173.0	7.6	18.2	100.08	3.34
	Julio	12.7	24.0	78	173.0	7.6	18.5	107.41	3.46
	Agosto	12.8	24.9	79	173.0	8.1	20.4	119.08	3.84
	Septiembre	12.7	25.7	79	173.0	8.7	22.6	128.53	4.28
	Octubre	12.8	26.0	79	173.0	8.9	23.4	138.48	4.47
	Noviembre	12.7	25.9	81	173.0	8.9	23.2	131.72	4.39
	Diciembre	12.8	25.3	83	173.0	8.6	22.4	129.30	4.17
Yangana (1835)	Enero	14.0	24.3	90	173.0	7.2	20.6	113.74	3.67
	Febrero	14.2	23.9	91	173.0	6.8	20.3	100.69	3.60
	Marzo	14.2	24.1	92	173.0	6.9	20.3	110.61	3.57
	Abril	14.1	24.2	91	173.0	6.9	19.4	102.58	3.42
	Mayo	14.2	24.1	91	173.0	6.7	17.8	96.80	3.12
	Junio	14.0	23.4	91	173.0	6.4	16.5	85.87	2.86
	Julio	14.0	22.8	90	173.0	6.0	16.3	87.56	2.82
	Agosto	13.9	23.5	89	173.0	6.5	18.2	99.12	3.20
	Septiembre	14.2	24.3	89	173.0	6.9	19.9	106.90	3.56
	Octubre	13.9	25.1	90	173.0	7.7	21.5	119.80	3.86

	Noviembre	13.7	25.2	90	173.0	7.9	21.7	116.84	3.89
	Diciembre	13.8	24.7	91	173.0	7.6	21.0	115.26	3.72
	Enero	20.0	33.7	72	70.4	9.3	23.8	154.47	4.98
	Febrero	20.6	33.2	77	52.9	8.6	23.2	134.65	4.81
	Marzo	20.3	33.2	78	56.0	8.7	23.2	148.98	4.81
	Abril	19.7	32.7	78	48.7	8.7	22	133.97	4.47
	Mayo	18.8	31.8	76	67.1	8.6	20.4	126.66	4.09
Zapotillo (223)	Junio	17.8	31.2	74	98.6	8.8	19.7	119.76	3.99
	Julio	17.0	31.3	72	124.7	9.2	20.7	132.72	4.28
	Agosto	16.1	32.0	71	140.7	10.1	23.4	151.30	4.88
	Septiembre	16.3	33.0	71	102.8	10.6	25.6	156.12	5.20
	Octubre	17.1	33.5	69	107.9	10.6	26	168.92	5.45
	Noviembre	17.8	33.6	70	89.4	10.4	25.4	158.05	5.27
	Diciembre	18.6	33.8	71	90.7	10.1	24.8	160.80	5.19

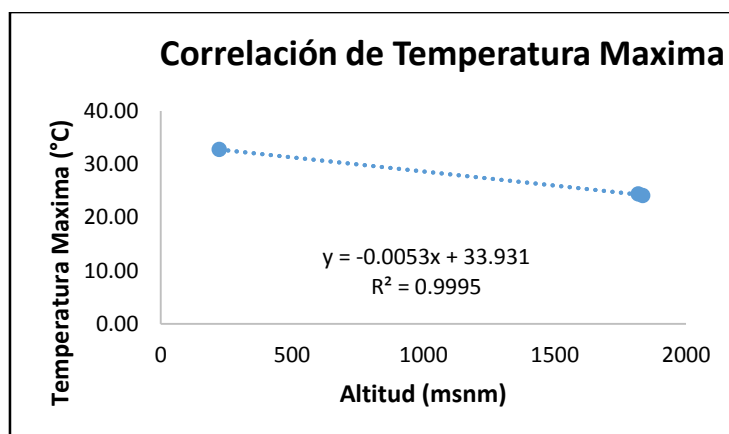


Figura 12. Correlación lineal de Pearson de los datos de temperatura máxima entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.

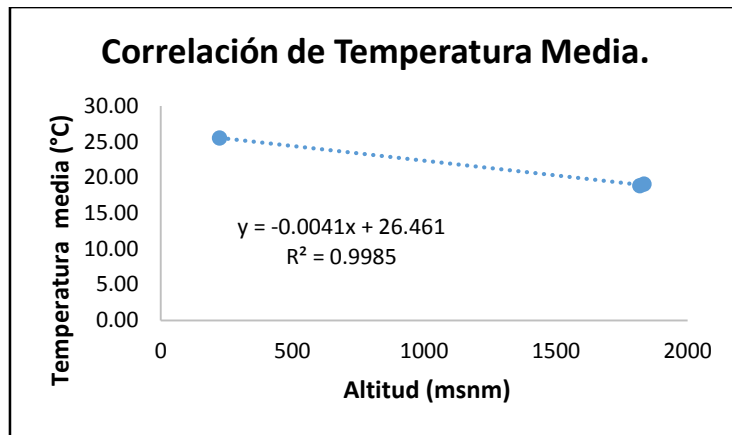


Figura 13. Correlación lineal de Pearson de los datos de temperatura media entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.

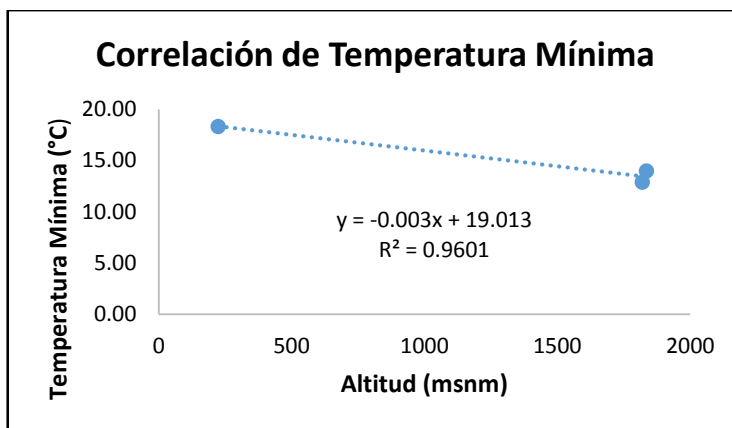


Figura 14. Correlación lineal de Pearson de los datos de temperatura mínima entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.

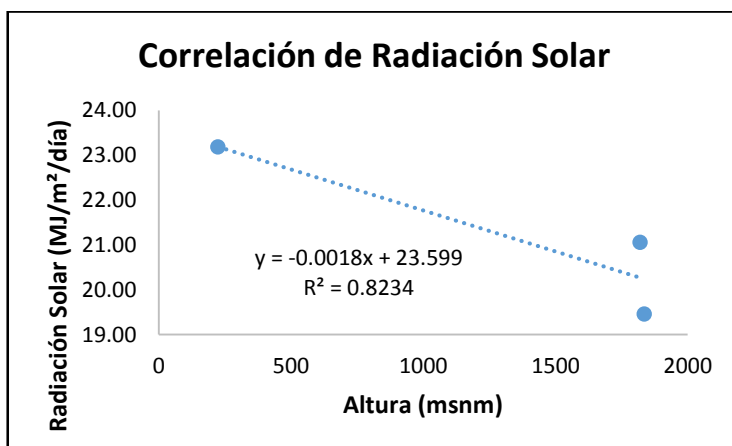


Figura 15. Correlación lineal de Pearson de los datos de radiación solar entre las estaciones meteorológicas Quilanga, Zapotillo y Yangana.

Tabla 18. Valores de kc y etapas de desarrollo del cultivo de café.

Etapas	Duración de Días		Kc
Inicio	0-60	60	0,75
Desarrollo	60-150	90	0,8
Floración	150-270	120	0,8
Cosecha	270-365	95	0,7
Total		365	3,05

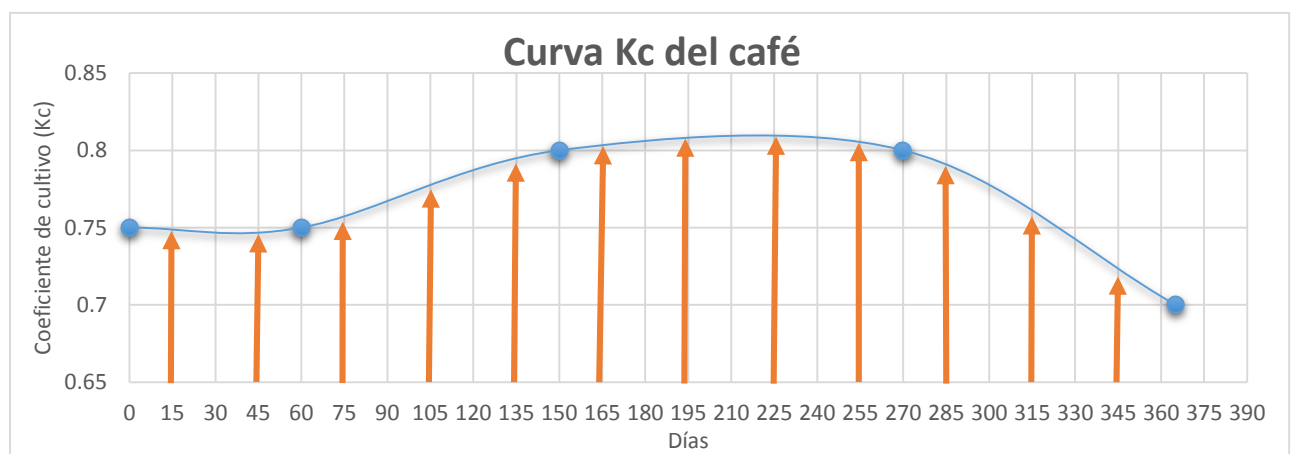
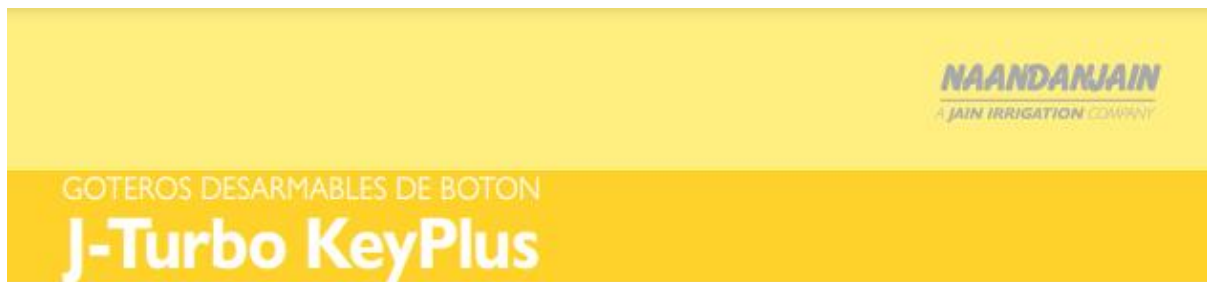


Figura 16. Curva del coeficiente del (kc) del cultivo de café.

Anexo 6. Ficha técnica del gotero Naandanjain. J-Turbo Key Plus no compensante 4 (l h -1).



Goteros Desarmables de Botón



APLICACIONES

- Recomendado para huertos, cultivos frutales, plantaciones, viveros y áreas verdes

ESTRUCTURA Y CARACTERISTICAS

- El gotero puede ser abierto para facilitar su limpieza
- Fabricado con plástico virgen para lograr un rendimiento estable
- El recorrido del flujo turbulento con una amplia sección transversal que asegura la resistencia al taponamiento
- Salidas extendidas que facilitan el uso de un tubo de extensión de PE o de vinilo
- Entrada estrecha en forma de cruz que actúa como filtro
- Coeficiente de variación de fábrica CV <= 3% asegura una alta uniformidad de emisión en campo (EU)
- Tapas de colores que facilitan la identificación del caudal

DATOS TECNICOS

- CV <= 3%
- Rango de regulación de presión: 0.5 – 2.5 bar
- Grado de filtración requerido: 100 micras (150 mesh)
- Diámetro de perforación requerido: 2.9 mm

DATOS TECNICOS Y CODIGO DE COLOR

Color de tapa e inserción	Descarga* (l/h)	Exponente del emisor(x)	Coefficiente de flujo(k)
Amarillo	2	0.48	2.0
Negro	4	0.48	4.0
Azul	8	0.48	8.0
Verde	14	0.48	14.0

* A una presión operativa de 1 bar

CAUDAL VS. PRESION

Presión (bar)	Caudal (l/h)			
	2 (l/h)	4 (l/h)	8 (l/h)	14 (l/h)
0.5	1.4	2.9	5.7	10.0
1.0	2.0	4.0	8.0	14.0
1.5	2.4	4.9	9.7	17.0
2.0	2.8	5.6	11.2	19.5
2.5	3.1	6.2	12.4	21.7
3.0	3.4	6.8	13.6	23.7
3.5	3.6	7.3	14.6	25.5



© NAANDANJAIN LTD. 03/2020

Anexo 7. Diseño hidráulico de las tuberías del sistema de riego por goteo.

a) Dimensionado de la tubería principal

TUBERÍA PRINCIPAL	
Material	PVC
Longitud	131 m
Caudal	0,800 l s ⁻¹
Coefficiente de rugosidad	150
Diámetro interno	36,8 mm
Área	0,00106 m ²
Presión de tubería	1,0 Mpa

Pérdidas de carga por fricción.

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} * D^{-4,87}$$

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{0,80 \text{ l s}^{-1}}{150} \right)^{1,852} * 36,8 \text{ mm}^{-4,87}$$

$$J = 0.018 \text{ m/m}$$

$$hf = J * l$$

$$hf = 0,018 \text{ m/m} * 131 \text{ m}$$

$$hf = 2,36 \text{ m}$$

Velocidad permisible del flujo

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

$$V = \frac{0,0008 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}}{0,00106 \text{ m}^2}$$

$$V = 0,755 \text{ m s}^{-1} \Leftrightarrow 0,80 \text{ m s}^{-1}$$

b) Dimensionado de la tubería secundaria

TUBERÍA SECUNDARIA.	
Material	PVC
Longitud	23 m
Caudal	0,800 l s ⁻¹
Coefficiente de rugosidad	150
Diámetro interno	29,8 mm
Área	0,0007 m ²
Número de salidas	-
Presión de tubería	0,8 Mpa

Pérdidas de carga por fricción.

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} * D^{-4,87}$$

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{0,80 \text{ l s}^{-1}}{150}\right)^{1,852} * 29,8\text{mm}^{-4,87}$$

$$J = 0.04\text{m/m}$$

$$hf = J * l$$

$$hf = 0,049\text{m/m} * 23\text{m}$$

$$hf = 1,13\text{m}$$

Velocidad permisible del flujo

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

$$V = \frac{0,0008\text{m}^3 \text{ s}^{-1}}{0,0007\text{m}^2}$$

$$V=1,14\text{m s}^{-1}$$

c) Dimensionado de la tubería terciaria

TUBERÍA TERCIARIA.	
Material	PVC
Longitud	12 m
Caudal	0,27 l s ⁻¹
Coefficiente de rugosidad	150
Diámetro interno	16,8 mm
Área	0,00022 m ²
Número de salidas	5
Presión de tubería	2,0 Mpa

Corrección de la longitud equivalente

$$Le = 0,10 * QL^{0.30} * N^{0.26}$$

$$Le = 0,10 * 192^{0.30} * 48^{0.26}$$

$$Le = 1,32 \text{ m}$$

$$\text{Longitud terciaria} = L + Le$$

$$\text{Longitud terciaria} = 12 + 1,32$$

$$\text{Longitud terciaria} = 13,32$$

Pérdidas de carga por fricción.

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} * D^{-4,87}$$

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{0,27 \text{ l s}^{-1}}{150}\right)^{1,852} * 16,8 \text{ mm}^{-4,87}$$

$$J = 0.105 \text{ m/m}$$

$$F = \left(\frac{2n}{2n-1}\right) * \left(\frac{1}{B+1}\right) + \left(\frac{(B-1)^{1/2}}{6n^2}\right)$$

$$F = \left(\frac{2(5)}{2(5) - 1} \right) * \left(\frac{1}{1,8 + 1} \right) + \left(\frac{(1,8 - 1)^{1/2}}{6(5)^2} \right)$$

$$F = 0,40$$

$$hf = J * l * F$$

$$hf = \frac{0,105m}{m} * 13,32 m * 0,40$$

$$hf = 0,56 m$$

Velocidad permisible del flujo

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

$$V = \frac{0,00027m^3 s^{-1}}{0,00022m^2}$$

$$V = 1,23m s^{-1}$$

d) Dimensionado de la tubería lateral

LATERALES DE RIEGO.	
Material	PVC
Longitud	46 m
Caudal	0,053 l s ⁻¹
Coefficiente de rugosidad	150
Diámetro interno	10 mm
Área	0,0007854 m ²
Número de salidas	48
Presión de tubería	2,0 Mpa

Pérdidas de carga por fricción.

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} * D^{-4,87}$$

$$J = 1,21 \times 10^{10} \left(\frac{0,053 l s^{-1}}{150} \right)^{1,852} * 10mm^{-4,87}$$

$$J = 0,067m/m$$

$$F = \left(\frac{2n}{2n-1}\right) * \left(\frac{1}{B+1}\right) + \left(\frac{(B-1)^{1/2}}{6n^2}\right)$$

$$F = \left(\frac{2(48)}{2(48)-1}\right) * \left(\frac{1}{1,8+1}\right) + \left(\frac{(1,8-1)^{1/2}}{6(48)^2}\right)$$

$$F = 0,36$$

$$hf = J * l * F$$

$$hf = \frac{0,067m}{m} * 46m * 0,36$$

$$hf = 1,11m$$

Velocidad permisible del flujo

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

$$V = \frac{0,0000533m^3 s^{-1}}{0,0007854m^2}$$

$$V=0,68 \Leftrightarrow 0,70 m s^{-1}$$

Anexo 8. Respaldo fotográfico.



Figura 17. Reconocimiento del área de estudio.



Figura 18. Realización de calicatas y descripción de perfiles.



Figura 19. Levantamiento topográfico del área de estudio.



Figura 20. Determinación de las constantes hidrofísicas en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Loja.

Anexo 9. Presupuesto general.

PRESUPUESTO GENERAL

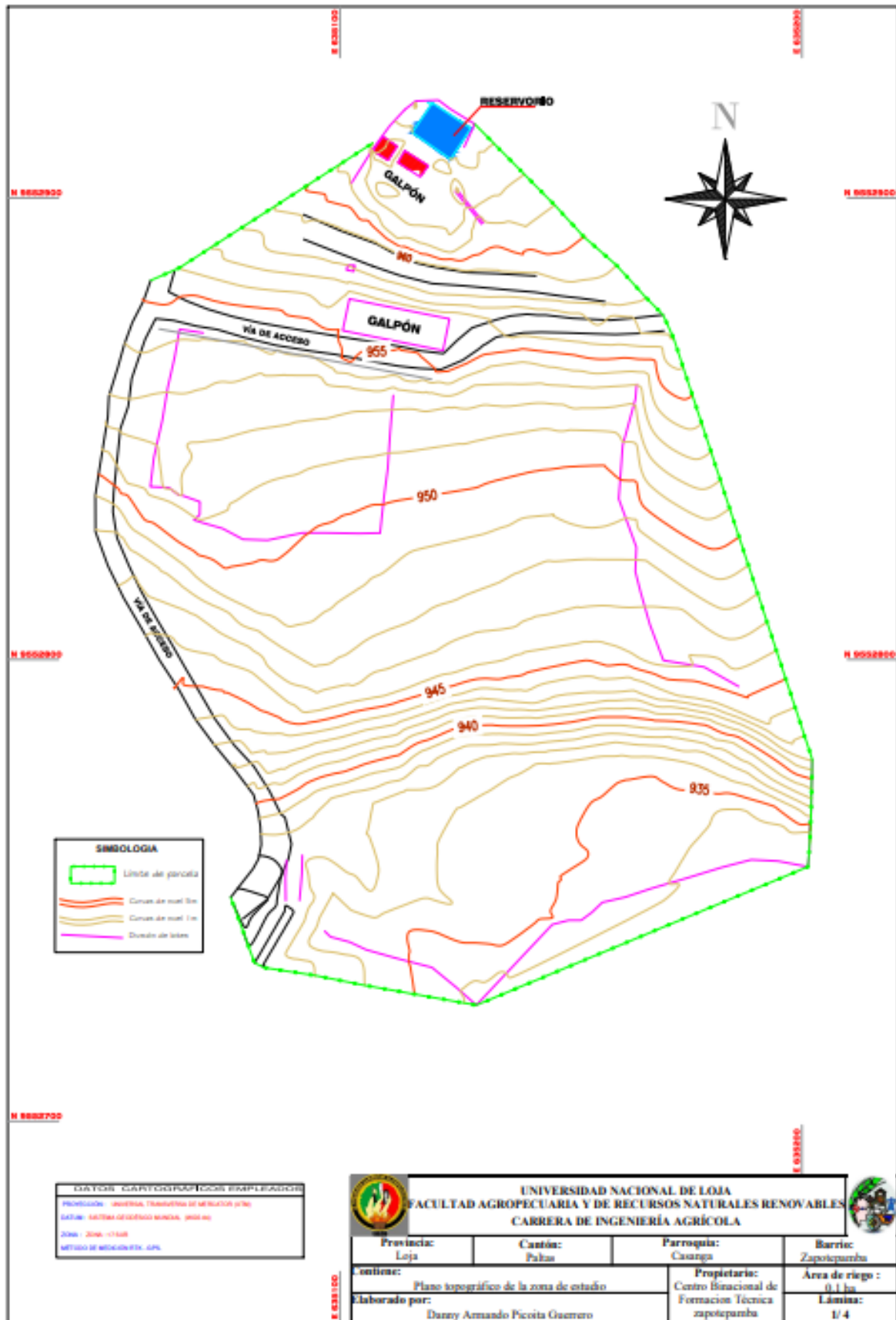
RUBROS	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (USD)	Valor total (USD)
I. Recursos Humanos				
Investigador tesista	Mes	2	350	700
II. Materiales y Suministros				
Riego por goteo	Ha	0.5	3000	1500
III. Transferencia de Resultados				
Día de campo	Día	1	150	150
IV. Subcontratos y Servicios				
Análisis de laboratorio.	Mes	4	70	280
Transporte	Pasaje	15	4	60
Preparación suelos, instalación del riego.	Jornal	1	120	120
Hospedaje	Día	3	10	30
Levantamiento Topográfico	Ha	0.5	150	75
TOTAL				2.915

**PRESUPUESTO DEL DISEÑO DE RIEGO POR GOTEO EN EL CENTRO
BINACIONAL TÉCNICA ZAPOTEPMABA**

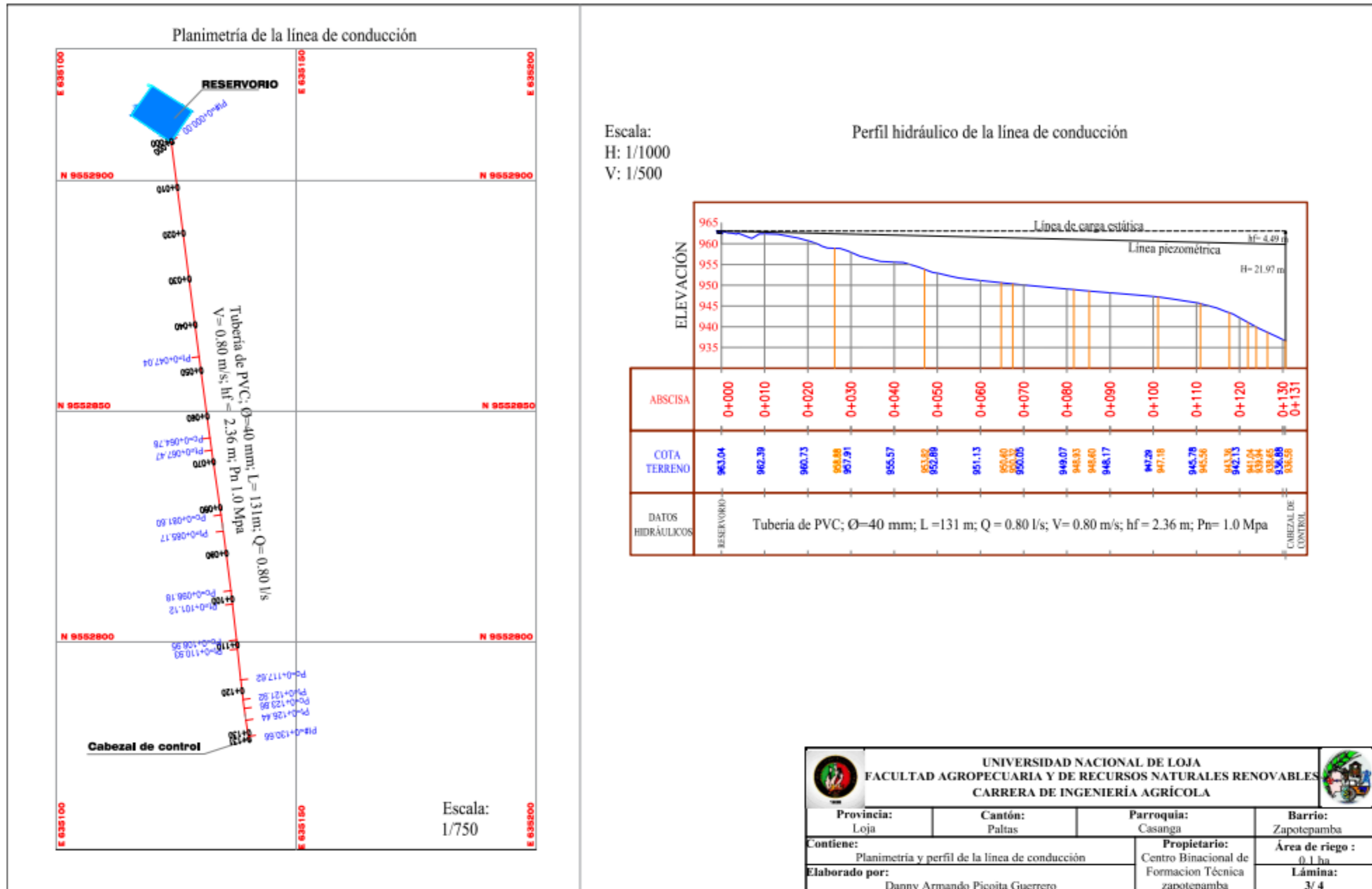
CONCEPTO	CANT.	U	PRECIO	TOTAL
CABEZAL DE RIEGO/FERTIRRIEGO.				
REDUCTOR CORTO 40 X 32 MM ERA	2	U	0,24	0,48
UNION UNIVERSAL PVC INY 32 MM ERA	2	U	1,68	3,36
CODO PEGABLE 32 MM X 90° ERA	4	U	0,45	1,80
ADAPTOR HEMBRA PVC 32 MM	2	U	0,38	076
ADAPTADOR MIXTO S/R PVC 32 MM	2	U	0,46	0,92
ADAPTADOR H 20 MM X 1 ERA	2	U	0,39	0,78
ADAPTADOR HEMBRA 20 MM PVC	2	U	0,16	0,32
TEE REDUCIDA 32 MM X 20 MM ERA	3	U	0,44	1,32
VALVULA DE COMPUERTA DE 32 MM DOUBLE LIN	1	U	9,25	9,25
VALVULAS DE BOLA 32 MM PVC	1	U	6,55	6,55
ADAPTADOR MACHO ROSCABLE DE 32 MM PVC	1	U	0,40	0.40
FILTRO AZUD 1 ANILLAS 120 MESH 32MM	1	U	10,96	10,96
MANOMETROS EX 100 PSI SS CONEXIÓN FONDO	2	U	13,99	27,98
VALVULAS DE BOLA 20 MM PVC	2	U	2,73	5,46
CODO DE 90° X 20 MM PVC	2	U	0,46	0,93
ADAPTOR HEMBRA 20 MM PVC	2	U	0,16	0,32
VENTURY GM 20 MM	1	U	20,89	20,89
UNION UNIVERSAL ROSCA 32 MM PVC	1	U	1,74	1,74
GRIFO ¾	1	U	6,10	6,10
MONTURA/COLLARIN DE 32 MM A ¾	1	U	1,47	1,47
TANQUE ROTOPLAS 600LITROS	1	U	97,86	97,86
TUBERIA PRINCIPAL				
TUBO DE PVC 40 MM X 6 M, 1.25 Mpa PLASTI	25	U	5,70	143.00
ABRAZADERA DE 63 MM	2	U	2,99	5,98
REDUCTOR 63 MM X 40 MM	1	U	1,48	1,48
ADAPTOR MACHO PVC 63 MM	1	U	1,23	1.23
TUBERIA SECUNDARIA				
TEE 32 MM X 20 MM PVC	2	U	0,54	1,08
TUBO DE PVC 32 MM X 6 M. 125 MPa	4	U	3,59	14,36

TAPON HEMBRA ROSCABLE 32 MM PVC	2	U	0,38	0,76
ADAPTADOR MIXTO S/R 32 MM PVC	2	U	0,32	0,64
TUBERIA TERCIARIA				
TUBO PVC 20 MM, 1.25 MPa	8	U	1,86	14,88
VALVULA DE BOLA 20 MM PVC	4	U	4,44	17,76
CODO PVC 20 MM X 90°	5	U	0,29	1,45
TAPON HEMBRA 20 MM LISO HIX	5	U	0,69	3,45
ADAPTADOR MIXTO S/R 20 MM PVC	5	U	0,27	1,35
CONECTOR GM 12 MM INICIAL FLEX	20	U	0,11	2,20
TUBERIA LATERAL				
MANGUERA HIDROFLEX 12 MM X 0.4 MPa	1.200	U	0,086	103,20
PERFORADOR ER 3 MM GOTERO	2	U	3,46	6,92
FIN DE LINEA DE 12 MM	30	U	0,045	1,35
GOTERO NAANDANJAIN NO COMPENSANTE 4L/H	750	M	0,16	120,00
MATERIAL ADICIONAL				
PEGA TG 705 1 4 GALON WELD-ON IPS	1	U	10,69	10,69
CINTA TEFLON AMARILLA REFORZADA	2	U	0,69	1,38
POLI - LIMPIA 1000 CC.	1	U	10,03	10,03
LABORES VARIAS				
EXCAVACIÓN SIN CLASIFICAR A MANO	24	m3	15,00	360,00
DESBROCE Y LIMPIEZA	0.1	Ha	85,00	8,50
COSTO DE INSTALACIÓN (AUSTRORIEGO)				200,00
TOTAL DEL PRESUPUESTO				1 235,34

Anexo 10. Plano topográfico de la zona de estudio.

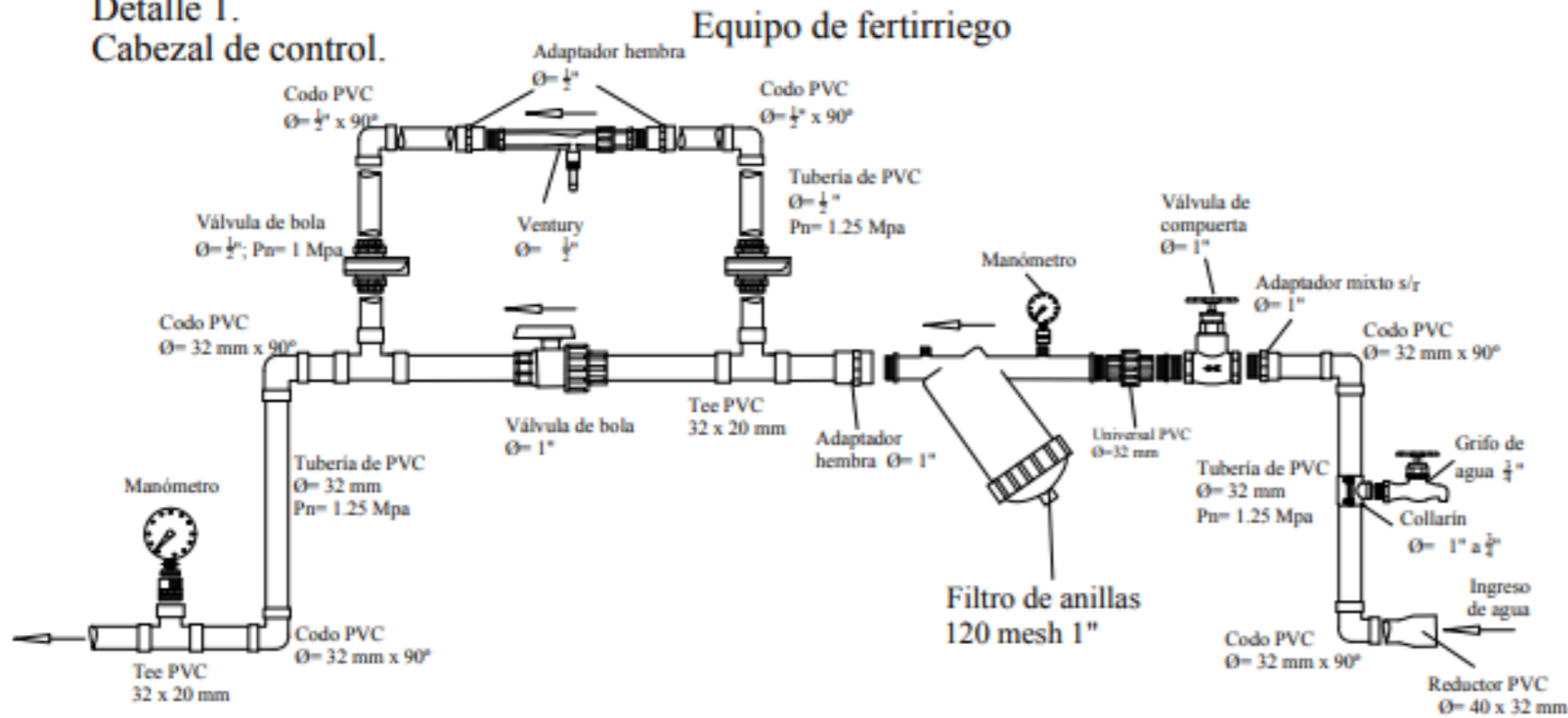


Anexo 12. Planimetría y perfil de la línea de conducción.

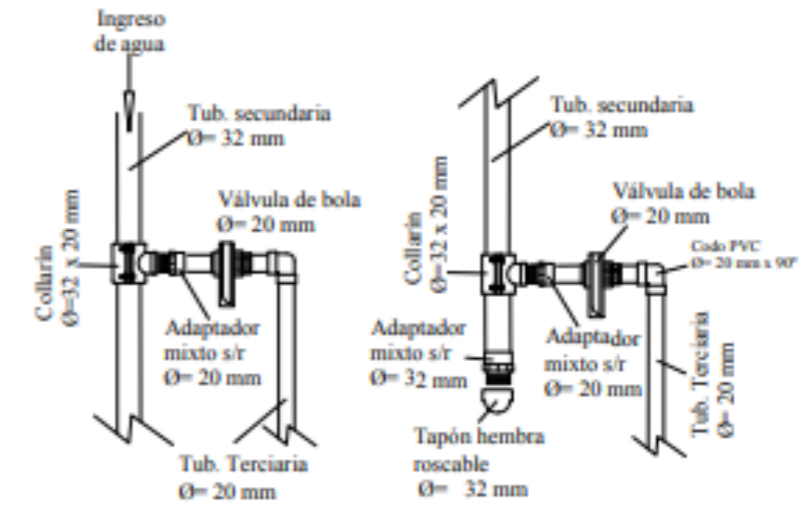


Detalles técnicos constructivos del sistema de riego por goteo

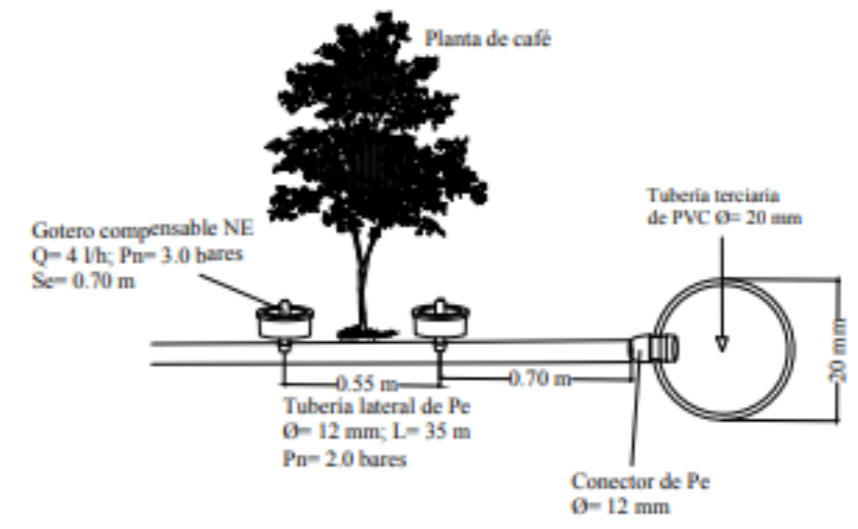
Detalle 1. Cabezal de control.



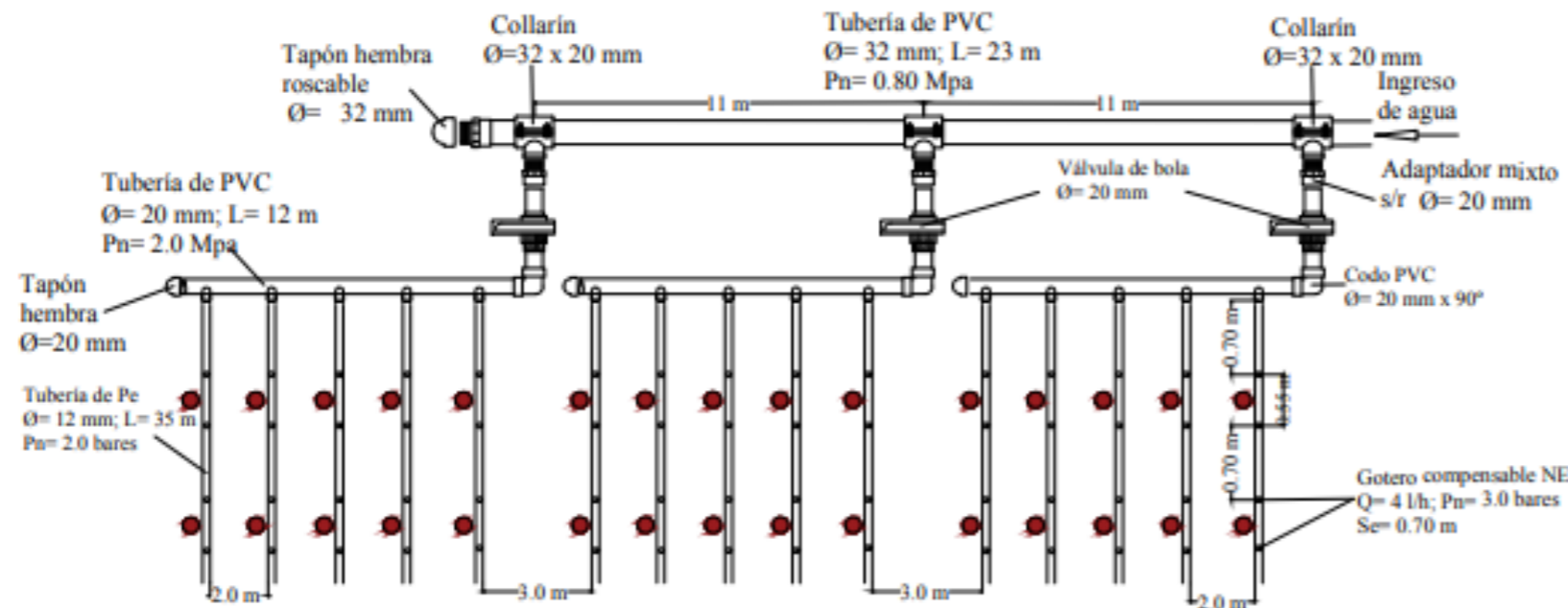
Válvulas de control parcelario



Nexo del conector de goteo a la tub. lateral



Distribucion de tuberías secundaria, terciarias y laterales de riego



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES CARRERA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA			
Provincia: Loja	Cantón: Palto	Parroquia: Casanga	Barrio: Zapotepamba
Contiene: Detalles técnicos del sistema de riego por goteo		Propietario: Centro Binacional de Formación Técnica zapotepamba	Área de riego : 0.1 ha
Elaborado por: Dany Armandó Picóta Guerrero			Lámina: 4/4

