

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO POR
BORBOLLEAMIENTO EN EL CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea canephora*) EN LA
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE SAPECHO**

REYNALDO MARCA CONDORI

LA PAZ – BOLIVIA

2022

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE AGRONOMÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

**IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO POR
BORBOLLEAMIENTO EN EL CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea canephora*) EN LA
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE SAPECHO**

*Tesis de Grado presentado como requisito
Parcial para optar el título de
Ingeniero Agrónomo*

REYNALDO MARCA CONDORI

ASESORES:

Ing. Ph. D. René Chipana Rivera.....

Ing. M. Sc. Carlos Eduardo Choque Tarqui

TRIBUNAL EXAMINADOR:

Ing. M. Sc. Casto Maldonado Fuentes.....

Ing. M. Sc. Juan José Vicente Rojas.....

Ing. M. Sc. Fanny Bertha Arragan Tancara.....

APROBADO

Presidente Tribunal Examinador

La Paz - Bolivia

2022

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la vida, quien supo guiarme por el buen camino y darme fuerzas para seguir adelante.

A mis padres Patricio Marca Ch. y Sofia Condori Q. quienes son el ejemplo y la luz de mi vida, por el cariño y apoyo incondicional que me brindaron en mi formación profesional.

A mis hermanos quienes me dieron constante apoyo y aliento moral en los momentos difíciles.

A mis amigos quienes me brindaron el cariño y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado fuerzas, valor para culminar esta etapa de mi vida y acompañarme todos los días.

Mis sinceros agradecimientos a la Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía por acogerme en sus aulas durante mi formación académica.

A los ingenieros y compañeros de la Estación Experimental de Sapecho por todo el apoyo brindado durante la etapa de investigación, y a todos mis amigos de la Carrera de Ingeniería Agronómica por brindarme siempre su apoyo moral, su amistad sincera y confianza.

A mis asesores Ing. Ph D. René Chipana Rivera y Ing. M.Sc. Carlos Eduardo Choque Tarqui por el apoyo constante en el perfil y así en el Borrador de tesis y la conclusión del documento final, por la comprensión, apoyo del día a día hasta llegar a concluir el trabajo.

A los tribunales revisores Ing. M.Sc. Casto Maldonado Fuentes, Ing. M.Sc. Juan José Vicente Rojas y la Ing. M.Sc. Fanny Bertha Arragan Tancara, por las observaciones, correcciones, revisiones y sugerencias realizadas para mejorar el documento del presente trabajo.

A mis padres Patricio Marca y Sofía Condori, por el apoyo que me brindan y el cariño demostrado en los buenos y malos momentos para mi formación académica, a mis hermanos, por el apoyo que me brindaron en todo este tiempo de la vida universitaria, también doy mis agradecimientos a todos mis amigos.

A todos ellos MUCHAS GRACIAS...

CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE ANEXOS.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Justificación.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1. Café robusta.....	6
3.1.1. Morfología.....	7
3.1.2. Ciclo fisiológico	8
3.2. Definición de riego	9
3.3. Sistemas de riego localizado.....	10
3.4. Sistema de riego por borboleamiento.....	10
3.4.1. Aplicaciones del sistema de riego por borboleamiento	11
3.4.2. Ventajas y desventajas del sistema de riego por borboleamiento	13
3.5. Hidráulica del sistema de riego por borboleamiento.....	14
3.5.1. Ecuaciones de pérdidas de energía por fricción	14
3.5.2. Coeficiente de reducción de Christiansen	15
3.5.3. Esclusas de aire en tuberías de baja presión	17
3.5.4. Consideraciones básicas de diseño	18
3.5.5. Diseño del sistema en suelos a nivel.....	19
3.6. Diseño agronómico	21
3.6.1. Parámetros físicos e hidro físicos del suelo.....	21
3.6.2. Evapotranspiración de referencia	23
3.6.3. Evapotranspiración del cultivo	24
3.6.4. Evapotranspiración reducida	24
3.6.5. Lámina de agua.....	24
3.6.6. Frecuencia de riego	25
3.6.7. Lámina neta de riego	25

3.6.8. Lámina bruta de riego.....	25
3.6.9. Volumen bruto por árbol	26
3.6.10. Tiempo de riego	26
3.7. Diseño hidráulico.....	26
3.7.1. Determinación de la distribución del campo	27
3.7.2. Selección de criterios de diseño	27
3.7.3. Diseño y cálculo de los componentes del sistema	28
3.7.3.1. Diseño del dispositivo de carga constante	29
3.7.3.2. Cálculo de la longitud y número de tuberías	29
3.7.3.3. Cálculo de la tasa de flujo de diseño para las tuberías	31
3.7.3.4. Selección de los diámetros de tubería	31
3.7.3.5. Cálculo de las elevaciones de la manguera de distribución.....	35
3.7.3.6. Trazado del diagrama piezométrico	35
3.8. Evaluación del sistema de riego.....	35
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
4.1. Localización	37
4.1.1. Ubicación.....	37
4.1.2. Latitud y longitud	38
4.2. Características climáticas.....	38
4.2.1. Clima	38
4.2.2. Topografía	38
4.2.3. Fisiografía.....	38
4.2.4. Suelo	39
4.2.5. Vegetación.....	40
4.3. Materiales y equipos	40
4.3.1. Material biológico.....	40
4.3.2. Material para el sistema de riego.....	41
4.3.3. Material de gabinete	41
4.4. Metodología	41
4.4.1. Procedimientos para diseño del sistema de riego	41
4.4.1.1. Recopilación de la información básica	41

4.4.1.1.1. Superficie del área de estudio	41
4.4.1.1.2. Estudio del suelo	42
4.4.1.1.2.1. Análisis físico del suelo	42
4.4.1.1.2.2. Propiedades hídricas del suelo	42
4.4.1.2. Diseño agronómico	43
4.4.1.3. Diseño hidráulico	45
4.4.1.4. Implementación.....	48
4.4.2. Evaluación	48
4.4.2.1. Evaluación del sistema de riego	48
4.4.2.2. Evaluación de parámetros vegetativos del cultivo	49
4.4.3. Diseño de investigación.....	50
4.4.3.1. Método estadístico	50
4.4.3.2. Croquis de la parcela experimental.....	51
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
5.1. Análisis climático.....	52
5.2. Superficie de la parcela en estudio	54
5.3. Análisis del suelo	55
5.3.1. Propiedades físicas e hidrofísicas	55
5.3.2. Infiltración del suelo.....	56
5.4. Diseño agronómico	58
5.4.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia.....	58
5.4.2. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo.....	59
5.4.3. Cálculo de la evapotranspiración reducida	59
5.4.4. Cálculo de la frecuencia de riego	59
5.4.5. Cálculo de la lámina neta	60
5.4.6. Cálculo de la lámina bruta	60
5.4.7. Cálculo del volumen bruto por árbol	60
5.4.8. Cálculo del tiempo de riego	61
5.5. Diseño hidráulico.....	62
5.5.1. Determinación de parámetros y criterios de diseño.....	62
5.5.2. Cálculo de los diámetros de tubería	63

5.5.3. Cálculo de la altura de los emisores	66
5.6. Evaluación.....	68
5.6.1. Evaluación del coeficiente de uniformidad del sistema de riego.....	68
5.6.2. Evaluación del efecto de aplicación de riego en el cultivo	69
5.6.2.1. Área foliar de la planta	69
5.6.2.2. Número de nudos y longitud de bandolas.....	70
5.6.2.3. Derrame productivo o purga del cafeto	72
6. CONCLUSIONES	74
7. RECOMENDACIONES.....	75
8. BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo fisiológico del café. Cárdenas <i>et al.</i> , 2012.....	9
Figura 2. Ubicación de la Estación Experimental de Sapecho	37
Figura 3. Raíz de una planta de café adulta. Loli, 2012.	44
Figura 4. Dispositivo de carga constante.	46
Figura 5. Croquis de campo de las unidades experimentales en estudio.	51
Figura 6. Diagrama bioclimático.....	53
Figura 7. Planimetría de la parcela en estudio.	54
Figura 8. Parámetros del suelo de la parcela experimental.	56
Figura 9. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada del suelo.....	57
Figura 10. Diagrama piezométrico para un lateral.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficiente de reducción de Christiansen	16
Tabla 2. Coeficientes de pérdida comunes, C_L , para sistemas por borboleamiento.	35
Tabla 3. Datos climáticos promedios de la Estación Experimental de Sapecho.	52
Tabla 4. Propiedades físicas e hidro físicas del suelo.....	55
Tabla 5. Evapotranspiración de referencia (ET _o).	58
Tabla 6. Parámetros y criterios de diseño.	62
Tabla 7. Perdidas de carga en la línea de derivación.....	63
Tabla 8. Perdidas de carga en la entrada de los laterales.	64
Tabla 9. Presión de entrada en cada lateral.....	64
Tabla 10. Perdidas de carga en los laterales.	65
Tabla 11. Altura de los emisores para un lateral.	67
Tabla 12. Clasificación de los coeficientes de uniformidad.	68
Tabla 13. Prueba de medias en la variable área foliar de la planta.....	69
Tabla 14. Prueba de medias en la variable número de nudos.	70
Tabla 15. Prueba de medias en la variable longitud de bandolas.	71
Tabla 16. Prueba de medias en la variable derrame productivo.	72

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Determinación de la textura del suelo por el método de Bouyoucos.....	83
Anexo 2. Determinación de la densidad aparente por el método del cilindro.....	85
Anexo 3. Datos de la prueba de infiltración del suelo.....	87
Anexo 4. Información general del sitio de la muestra.....	89
Anexo 5. Descripción morfológica del suelo del sitio de muestra.....	90
Anexo 6. Valores de coeficientes del cultivo, Kc.....	91
Anexo 7. Láminas de riego aplicados al tratamiento por planta.....	92
Anexo 8. Procesamiento de datos de la evaluación del sistema de riego.....	93
Anexo 9. Datos de evaluación de área foliar de la planta.....	97
Anexo 10. Datos de evaluación de número de nudos.....	98
Anexo 11. Datos de evaluación de longitud de bandolas.....	99
Anexo 12. Datos de evaluación de derrame productivo.....	100
Anexo 13. Presupuesto para la implementación del sistema por borboleamiento..	101
Anexo 14. Álbum de fotografías.....	102

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la Estación Experimental de Sapecho perteneciente a la Facultad de Agronomía - UMSA, situada a 239 Km de la ciudad de La Paz, presenta una temperatura promedio de 26 °C con una precipitación anual de 1.500 mm, existe épocas marcadas de estiaje y del periodo de lluvias. Por tal razón para paliar la época seca se implementó el sistema de riego por borboleamiento, ante esta situación fue necesario realizar la evaluación de este sistema y su efecto en el cultivo, por lo cual el objetivo planteado fue: Implementar y evaluar el sistema de riego por borboleamiento en el cultivo de café (*Coffea canephora*). Para la implementación del sistema se realizó el diseño agronómico e hidráulico que permitió el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo así como los componentes del sistema, la instalación de este sistema se hizo en una superficie de 720 m², consta de un tanque de 2.300 litros que funciona como dispositivo de carga constante con la ayuda de un flotador, una línea de derivación de 38,1 mm de diámetro con una longitud de 21 m, cuatro laterales de 19,5 mm de diámetro y 28,5 m de longitud cada una y mangueras de distribución de 4,9 mm de diámetro y 2,5 m de longitud, la misma fue instalada para irrigar a 80 plantas de café de la variedad robusta. Posteriormente, se efectuó la evaluación de funcionamiento del sistema de riego en la cual se comprobó que el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) es de 83% y coeficiente de uniformidad de distribución (CUD) es igual a 76%, estos resultados nos indican que el sistema implementado se encuentra entre bueno y aceptable. La evaluación sobre el efecto del riego nos mostró que la aplicación de riego optimo es positivo en el crecimiento vegetativo, siendo superior en 30% en desarrollo del área foliar, 30,1% en números de nudos, 38,4% de longitud de bandola y se redujo en un 17% en las pérdidas de frutos respecto al testigo.

SUMMARY

The present research work was developed in the Sapecho Experimental Station belonging to the Faculty of Agronomy - UMSA, located 239 Km from the city of La Paz, presents an average temperature of 26 °C with an annual rainfall of 1.500 mm, there are periods marked for low water and rainy season. For this reason, to alleviate the dry season, the bubbling irrigation system was implemented, in view of this situation it was necessary to carry out an evaluation of this system and its effect on the crop, for which the proposed objective was: Implement and evaluate the irrigation system by bubbling in the coffee crop (*Coffea canephora*). For the implementation of the system, the agronomic and hydraulic design was carried out that allowed the calculation of the water needs of the crop as well as the components of the system, the installation of this system was done on an area of 720 m², it consists of a 2.300 liter tank that works as a constant load device with the help of a float, a 38.1 mm diameter bypass line with a length of 21 m, four laterals of 19,5 mm in diameter and 28,5 m in length each and distribution hoses of 4,9 mm in diameter and 2,5 m in length, it was installed to irrigate 80 coffee plants of the robusta variety. Subsequently, the operation evaluation of the irrigation system was carried out in which it was found that the Christiansen uniformity coefficient (CUC) is 83% and distribution uniformity coefficient (CUD) is equal to 76%, these results indicate that the implemented system is between good and acceptable. The evaluation on the effect of irrigation showed us that the application of optimal irrigation is positive in vegetative growth, being 30% higher in the development of the leaf area, 30,1% in the number of nodes, 38,4% in the length of bandola and it was reduced by 17% in the loss of fruits compared to the control.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad que impulso a la civilización para desarrollarse y subsistir, y es la responsable del consumo del 70% de agua dulce del planeta, actualmente el recurso hídrico es una limitante, por lo que la agricultura y sus aplicaciones de agua deben efectuarse con la mayor eficiencia posible, es decir, se debe aprovechar el agua disponible de tal forma que se pueda regar mayor área o cantidad de plantas con la menor cantidad de agua (FAO, 2008).

Actualmente, se considera que el fenómeno del cambio climático es un hecho y su intensidad e impacto tiene variaciones considerables en las diferentes regiones. La agricultura mundial tendrá que enfrentar muchos retos porque un calentamiento por encima de 2,5 °C puede afectar la oferta mundial de alimentos, así como también el precio (FAO, 2009).

En muchos países los programas de conservación del agua de riego son parte integral de planes de manejo, nuevas técnicas de riego deben ser introducidas por los agricultores para reducir las pérdidas totales de agua, entre estas tenemos el microriego (riego por goteo y microaspersión), no obstante, los elevados costos que significa la implementación de estos (principalmente los equipos de filtración y bombeo) hace inviable la introducción a nivel de pequeño y medio agricultor. Una de las tecnologías que ha recibido atención últimamente son los sistemas de microriego que no requieren equipos de filtración ni bombeo.

Según Yitayew, *et al.* (1995), estos sistemas son conocidos como sistemas a baja presión o “borbolleamiento” (bubbler), que no precisa sistemas de filtración y requieren presiones bajas para distribuir agua a los cultivos. Este sistema se basa en el flujo gravitacional debido a pequeñas cargas hidrostáticas, donde la distribución del agua se da directamente a la zona radicular a través de orificios relativamente grandes, lo que elimina los problemas de obturación de los emisores.

A la hora de implementar un sistema de riego, se debe de tomar en cuenta diferentes variables, en el caso del café no era común la utilización de los sistemas de riego; sin

embargo, debido al cambio climático presentado en los últimos años se vuelve una necesidad. En algunas especies, como Arábica y Robusta, hay retorcimiento de los brotes antes de que se abran, esto se produce cuando el estrés hídrico se crea después de que pequeñas cantidades de lluvia han provocado el crecimiento inicial, como resultado de la torsión, no pueden alcanzar la fase de apertura y por lo tanto se secan (Camargo *et al.*, 2008).

La torsión (yemas sin abrir o flores secas) es un fenómeno típico causado por la escasez de agua, e incluso puede producir una pérdida de rendimiento de hasta el 50%. La introducción del riego reduce el porcentaje de flores secas (estrellas) del 57% a menos de 5%, con algunos porcentajes prácticamente insignificantes (Camargo *et al.*, 2008).

La planta de café se puede considerar como de cierta tolerancia a la sequía, aunque la cosecha se puede ver reducida significativamente cuando el suministro es inadecuado. Debido a la carencia de agua, se merma el crecimiento vegetativo y el hecho de que el café usualmente produce flores y frutos sólo en la parte formada por el crecimiento de ramas laterales durante el año anterior, permite que la disminución de la cosecha por una deficiencia de agua, muy rara vez se observe en el mismo año en que ha ocurrido esa carencia, sino más bien se presenta en la cosecha siguiente (CORECAF, 2000).

En el presente trabajo se muestra las consideraciones teóricas y técnicas para realizar el diseño, instalación y evaluación del sistema de riego por borbolleamiento. Así también determinar el efecto de la aplicación de riego en el crecimiento vegetativo del cultivo de café, tomando en cuenta los requerimientos hídricos del cultivo, esto para mejorar los rendimientos y calidad del producto.

1.1. Antecedentes

Rawlins (1977), describió por primera vez un sistema de riego de baja carga, sistema de conducto cerrado llamado sistema de riego por burbujeo o borboleamiento que funciona a baja presión, que era apto para cultivos de árboles como huertos y viñedos.

Este sistema opera de una manera que es muy similar a un sistema de goteo presurizado, pero entrega tasas de flujo mucho mayores al sistema de riego por goteo, a través de una tubería de diámetro pequeño, denominado manguera de distribución, esta se encuentra conectada a una tubería lateral. Los laterales se entierran entre hileras alternas de árboles, las mangueras de distribución suministran de agua a cada árbol. Se aplica agua a una cuenca alrededor de cada árbol, con este sistema se puede lograr una uniformidad de riego cercana al 100%, dependiendo del tamaño del sistema, la carga de operación puede variar de 0,5 a 2 metros (Reynolds, 1993).

Los sistemas de riego por borboleamiento son particularmente adecuados para cultivos hortícolas y especies frutales, estos sistemas operan a bajas presiones y sin necesidad de equipos de filtración y bombeo, pero sin embargo pese a estas ventajas y simplicidad, los sistemas de riego por borboleamiento son desconocidos por los técnicos encargados de riego e irrigadores de nuestro país.

Los sistemas de riego localizados, si están bien diseñados y gestionados, permiten alta eficiencia de riego y uso del agua, y entre ellos está el riego por borboleamiento, un tipo de sistema de flujo continuo localizado, considerado el de menor costo de equipo y operación (Abdel, 2016).

1.2. Justificación

Con el presente trabajo de investigación, se implementó un sistema de riego de baja presión para cultivos de campos a nivel que no utiliza equipos de filtración y bombeo, por lo que requiere un menor costo de inversión. En el caso del café no era común la utilización del riego, sin embargo, debido al cambio climático presentado en los últimos años se volvió una necesidad.

El alto costo de instalación del riego localizado es uno de los principales problemas que deben afrontar los medianos y pequeños productores, aunado a ello está la alta demanda de energía para obtener la carga hidráulica necesaria para el funcionamiento del sistema lo que implica gastos por bombeo, por ello, se pretende utilizar un sistema de riego localizado a baja presión que contribuya a la satisfacción de los requerimientos hídricos del cultivo de café.

Debido a la poca información sobre el diseño de los sistemas de riego por borbotamiento, tanto en el diseño agronómico y principalmente en el diseño hidráulico, se planteó determinar la eficiencia del comportamiento de la distribución del agua. Además, que el coeficiente de uniformidad es el mejor indicador de la bondad de un sistema de riego, y a partir de él se puede obtener la eficiencia de aplicación de agua que se utiliza para la programación de riegos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Implementar y evaluar el sistema de riego por borbotamiento en el cultivo de café (*Coffea canephora*) en la Estación Experimental de Sapecho.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar el diseño agronómico e hidráulico del sistema de riego por borbotamiento en función de los parámetros agronómicos considerando las condiciones climáticas, propiedades físicas del suelo y las necesidades hídricas del cultivo de café.
- Realizar la implementación del sistema de riego por borbotamiento en el cultivo de café.
- Evaluar la uniformidad de distribución del sistema de riego por borbotamiento.
- Determinar el efecto de la aplicación de riego por borbotamiento sobre el crecimiento vegetativo del cultivo de café.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Café robusta

El café robusta (*Coffea canephora*) es una planta nativa de los bosques ecuatoriales de África occidental, desde la costa Oeste en Uganda y la parte Sur del Sudán, en alturas que van desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 1.000 metros (Méndez, 2011).

El café robusta fue utilizado por los nativos de toda el área de donde proviene, mucho antes que los europeos llegaran al África Ecuatorial. Los primeros colonizadores, movilizados al interior de esta parte del continente, encontraron árboles de café en parcelas alrededor de las villas o en las junglas próximas, que eran cosechados regularmente (Méndez, 2011).

El café es un cultivo permanente, estos arbustos requieren una temperatura elevada y una humedad atmosférica importante. Es una planta de semi sombra, que hay que proteger de los vientos y de las temperaturas bajas. Las temperaturas medias, óptimas para el cultivo del café robusta varían entre 18,3 a 26,7 °C, también se indica que las localidades con temperaturas medias que se alejan del rango de 18 a 27 °C son poco adecuadas para el cultivo de café robusta (Enríquez y Duicela, 2014).

Se considera que para el café robusta se requiere de 1.900 a 2.500 mm/año; además se indica que un periodo seco de tres meses favorece el crecimiento de las raíces, maduración de las ramas, iniciación floral y maduración de los frutos (Enríquez y Duicela, 2014).

El café arábico se adapta bien a ambientes que tengan de 70% a 95% de humedad relativa, para el café robusta, la humedad relativa media óptima es de 80% a 90%. (Duicela, 2001).

El cafeto se cultiva en una gran cantidad de lugares en el mundo, los suelos adecuados varían mucho de una zona a otra, aún dentro de un área pequeña. Los suelos más productivos de café son los latosoles arcillosos (Enríquez, 1993).

3.1.1. Morfología

El cafeto es un arbusto o árbol pequeño, perennifolio, de tronco recto que puede alcanzar los 10 metros en estado silvestre; en los cultivos en manejo se les mantiene normalmente en tamaño más reducido, alrededor de tres metros (Figueroa, Pérez y Godínez, s/f).

La raíz: El sistema radicular es superficial estando el 60% en los primeros 30 centímetros de profundidad y la raíz pivotante puede llegar a más de un metro de profundidad.

Tallo: El arbusto de café está compuesto generalmente de un solo tallo o eje central, el tallo exhibe dos tipos de crecimiento, uno que crece verticalmente y otro en forma horizontal o lateral. Las ramas de crecimiento lateral o plagiotrópico se originan de unas yemas que se forman en las axilas superiores de las hojas. En cada axila se forman dos o más yemas unas sobre las otras. De las yemas superiores se desarrollan las ramas laterales que crecen horizontalmente. El crecimiento vertical u ortotrópico es originado por una zona de crecimiento activo o plúmula en el ápice de la planta que va alargando a ésta durante toda su vida, formando el tallo central, nudos y entrenudos.

Ramas: Las ramas laterales primarias se originan de yemas en las axilas de las hojas en el tallo central. Estas ramas se alargan continuamente y son producidas a medida que el eje central se alarga y madura. Las ramas primarias plagiotrópicas dan origen a otras ramas que se conocen como secundarias y terciarias. En estas ramas se producen hojas, flores y frutos.

Hojas: Son opuestas y alternas en el tallo ortotrópico y en ramas plagiotrópicas son opuestas. Son de color verde oscuro y brillante en la parte superior y verde claro en el interior. Ovals y terminan en punta, sus bordes son ondulados. Las hojas nuevas presentan una coloración bronceada o verde claro y después toman su coloración definitiva.

Flores: Se localizan en las axilas de las hojas de las ramas plagiotrópicas. La corola es blanca y está formada por cinco pétalos fusionados en su base, dando origen al

tubo de la corola; el cual se encuentra inserto en la parte superior del ovario. El ovario, normalmente con dos lóculos, contiene un ovulo por lóculo que tiene cinco estambres con antenas de color blanco y bifurcado en el estigma.

Fruto: El fruto es una drupa de superficie lisa y brillante, de pulpa delgada fácilmente desprendible del pergamino, cuando maduran los frutos son rojos o amarillos, con dos semillas, en ocasiones solo uno de los óvulos se fecunda y se desarrolla originando una semilla de forma redonda que se le conoce como café caracol.

Semilla: Son oblongas, plano convexas, representan del 35 al 38% del fruto del café, están constituidas por el endocarpio o pergamino, una película plateada o perisperma, endosperma cotiledón o embrión. El endospermo contiene muchos compuestos, entre los que destacan la cafeína, proteínas, aceites, azúcares, dextrina, celulosa, hemicelulosa, ácido clorogénico y minerales entre otros.

3.1.2. Ciclo fisiológico

El ciclo fisiológico del café es el tiempo transcurrido de una campaña a otra, dura 12 meses, y tiene cuatro etapas bien marcadas (Cárdenas *et al.*, 2012).

Floración: Las yemas se transforman en flores o ramas, hay mayor desarrollo vegetativo, gran producción de ramas y hojas, máxima actividad radicular y mayor formación de pelos absorbentes. Esta etapa presenta una duración de tres meses.

Desarrollo del fruto o llenado de grano: Llenado intenso del grano, menor producción de ramas y hojas, y menor formación de pelos absorbentes. Esta etapa presenta una duración de cuatro meses.

Cosecha: Crecimiento vegetativo mínimo, se presenta la formación de nuevas yemas, menor actividad radicular y degradación de pelos absorbentes. Esta etapa presenta una duración de tres meses.

Descanso: No hay desarrollo de ramas y hojas, no hay absorción de agua y nutrientes, las yemas se diferencian y crecen, pero no se abren. Esta etapa presenta una duración de dos meses.

Mes	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Etapa	Floración			Llenado de grano				Cosecha			Descanso	



Figura 1. Ciclo fisiológico del café. Cárdenas *et al.*, 2012.

3.2. Definición de riego

El riego es la aplicación de agua a los cultivos en forma artificial, oportuna y uniforme, de esta definición se desprende que para regar no basta aplicar agua a los cultivos a través de cualquier método, sino que es necesario hacerlo en forma oportuna, manejando las frecuencias y los tiempos de aplicación de acuerdo a las características del cultivo, clima y suelo (Ferreyra, 2005).

En términos generales, éste consiste en la aplicación artificial de agua al terreno para que los cultivos puedan satisfacer la demanda de humedad necesaria para su desarrollo (Cisneros, 2003).

Los objetivos del riego son:

- Proporcionar la humedad necesaria para que los cultivos se desarrollen.
- Proporcionar nutrientes en disolución.
- Asegurar las cosechas contra sequías de corta duración.
- Refrigerar el suelo y la atmósfera para mejorar el medio ambiente de la planta.
- Disolver las sales contenidas en el suelo.
- Reducir el contenido de sales de un suelo existiendo un adecuado drenaje.

3.3. Sistemas de riego localizado

Se denomina sistema de riego o perímetro de riego, al conjunto de estructuras, que hacen posible que una determinada área pueda ser cultivada con la aplicación del agua necesaria a las plantas. Un sistema de riego consiste en un conjunto de elementos que garantiza la conducción y distribución eficiente del agua dentro del área regada. El conjunto de componentes dependerá si se trata de un sistema de riego superficial o presurizado (Bi, 2010).

El riego localizado consiste en la aplicación de agua para humedecer apenas parte del volumen ocupado por el sistema radicular de los cultivos. El agua es conducida por una extensa red de tuberías de baja presión hasta cerca de la planta, esta es suministrada a través de emisores de tal manera que la humedad del suelo este próximo a capacidad de campo. El emisor además de distribuir uniformemente el agua debe disipar la presión, en este método el suelo funciona como un pequeño reservorio, pero sin reducir la oferta de agua a la planta. Es un riego de alta frecuencia, los principales tipos del sistema de riego localizado son: goteo, cintas de exudación, microaspersión, borboleamiento, capsulas y tubos porosos (Chipana, 1996).

El riego localizado es la aplicación lenta de agua al suelo a través de dispositivos mecánicos llamados emisores, situados en puntos seleccionados a lo largo de la línea de suministro de agua (Bamohuni, 2011). La eficiencia o eficacia de un sistema de riego se valora en función de la relación al agua que necesita el cultivo respecto al volumen de agua que se aplica (Gispert y Joan, 2008).

3.4. Sistema de riego por borboleamiento

El primer sistema de riego por borboleamiento fue introducido y desarrollado para el Departamento de Agricultura y Salinidad de los Estados Unidos. El sistema consistió de una línea principal conectado a una fuente de agua, con un dispositivo que mantenía una carga constante, líneas de derivación, laterales y mangueras de distribución de agua de pequeño diámetro, conocidas también como emisores. Los laterales son instalados entre dos hileras de frutales, y las mangueras de pequeño

diámetro (emisores) son insertados en los laterales para distribuir agua a los árboles. Las mangueras son aseguradas a estacas o al árbol, y la altura de las mangueras de distribución es ajustada de tal manera que el caudal por emisor sea igual en todos los puntos. El nombre del sistema de riego por borbotamiento se debe a que cuando se pone en funcionamiento este sistema, emite un ruido al salir el agua de los emisores que se asemeja a un burbujeo (cuando el aire escapa de las tuberías) (Reynolds, 1993).

El diseño de los sistemas de riego por borbotamiento es simple debido a las mangueras de distribución, lo que contrasta con los emisores pequeños usados comúnmente por otros sistemas de microriego. Esas mangueras de distribución pueden presentar grandes tasas de flujos lo que se almacena en pequeñas bacías (pozas) alrededor de las plantas, y no requieren sistemas de filtración debido al tamaño de los orificios. Las bacías son usualmente circulares o de forma rectangular, y están circundadas por pequeños diques, así el agua es uniformemente distribuida en la zona radicular (Reynolds, 1993).

3.4.1. Aplicaciones del sistema de riego por borbotamiento

El sistema de micro irrigación esta subdividido en cuatro categorías relacionadas con su diferencia en el diseño hidráulico: sistemas de goteo, aspersion, borbotamiento y sub superficiales. El diseño del sistema de riego por borbotamiento difiere del diseño de otros sistemas de micro irrigación porque se basan en el flujo por gravedad y no requieren energía externa ni elaborados sistemas de filtración (Reynolds, 1993).

El agua que se aplica a la superficie del suelo mediante el riego por borbotamiento como un pequeño chorro, típicamente de un tubo de diámetro pequeño (1 mm a 13 mm) o un emisor disponible comercialmente. Porque las tasas de aplicación generalmente exceden las tasas de infiltración del suelo, las pequeñas cuencas o surcos son necesario para controlar la distribución del agua en el suelo para ahorrar agua cerca de la zona de la raíz de la planta (Lamm *et al.*, 2007).

El sistema de riego por borboleamiento reduce el requerimiento energético, este es un tipo de sistema de micro irrigación que típicamente entrega tasas de flujo de 0,032 a 0,063 l/s a cada árbol a través de un tubo de pequeño diámetro (manguera de distribución) unido a un lateral de gran diámetro que se entierra entre dos filas de árboles utilizando 38,1 a 120 mm de diámetro de la tubería lateral (Hull, 1981).

El rasgo distintivo de los sistemas por borboleamiento son las mangueras de distribución flexibles. El agua es distribuida a las plantas ajustando las elevaciones de las salidas de la manguera de distribución a lo largo el lateral de modo que el agua salga de todas las mangueras aproximadamente a las mismas tarifas (Yitayew, 1995).

El riego por borboleamiento es muy sensible a los cambios de altura de presión, y una fuente de altura constante es esencial para un huerto o plantación comercial. Un cambio en la altura de presión en la entrada al sistema da como resultado una aplicación no uniforme en cada salida. La altura de presión de un metro es muy pequeña y los pequeños cambios en la altura pueden por lo tanto tener un efecto marcado en el caudal, que se fija una vez que el sistema está instalado y no se cambia fácilmente (Hull, 1981).

Los sistemas de riego por borboleamiento son adecuados para cultivos perennes, particularmente huertos y vides, porque el sistema de riego normalmente incluye cañerías enterradas y pequeñas cuencas de barro alrededor de las plantaciones. Los sistemas por borboleamiento también se pueden adaptar a cultivos en hileras que utilizan surcos, los laterales se colocan a lo largo de los surcos después de la siembra y se retiran del campo a la cosecha, y también se prefiere una textura de suelo fina. (Lamm *et al.*, 2007).

El concepto de borboleamiento no ha sido ampliamente adoptado en la agricultura, quizás una de las principales razones por el desinterés es que los criterios de procedimientos de diseño y operación recomendada, no han estado fácilmente disponibles (Yitayew, 1995).

3.4.2. Ventajas y desventajas del sistema de riego por borboleamiento

Lamm *et al.* (2007), indica que los sistemas por borboleamiento tienen algunas ventajas y desventajas en comparación con otros sistemas de micro irrigación:

Ventajas

- Los requerimientos de energía son bajos debido a la aplicación de agua por gravedad.
- Baja susceptibilidad a la obstrucción del emisor debido a su gran diámetro.
- Se puede utilizar agua con mayor contenido de sólidos en suspensión.
- Los costos operativos son bajos debido al bajo requerimiento de energía y mantenimiento.
- La duración de un evento de riego es corta por las grandes tarifas de descarga.
- Las sales acumuladas son uniformemente lixiviadas.
- Las pequeñas pozas alrededor de la planta aumentan la captación de lluvia.
- Toda la red de tuberías está enterrada por lo tanto no hay problemas en las operaciones de campo.
- La tecnología es simple y no hay el uso de equipos altamente sofisticados, por tanto, hay menor necesidad de mantenimiento del sistema.
- El costo inicial y los costos de mantenimiento son bajos comparados con otros sistemas de micro irrigación.
- El sistema puede ser operado por agricultores y trabajadores no calificados.

Desventajas

- Criterios de metodología de diseño y procedimientos operativos no están bien definidos y documentados.
- El concepto de borboleamiento no ha sido ampliamente adoptado en la agricultura.
- Aprisionamiento de aire en la tubería la red puede provocar bloqueos.
- La topografía de la parcela debe ser casi nivelado.

- El sistema no es tan adecuado para suelos arenosos debido a su gran velocidad de infiltración.
- Posiblemente más lixiviación y pérdidas por evaporación que con el sistema por goteo.
- Generalmente mayor consumo de agua que el sistema de goteo.

3.5. Hidráulica del sistema de riego por borboleamiento

Los sistemas de riego presurizado se pueden clasificar en términos generales en dos tipos que son, por aspersión y sistemas de micro irrigación, el procedimientos de diseño para la mayoría de las sub ramas de estos sistemas están bien definidos por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE), sin embargo, el diseño de los sistemas por borboleamiento aún no ha sido bien definido y es algo diferente de otros sistemas de micro irrigación porque se basan en flujo por gravedad y no requieren energía externa (Reynolds, 1993).

3.5.1. Ecuaciones de pérdidas de energía por fricción

La pérdida de energía por fricción a través de cada tubo del sistema comprenderá una cierta cantidad de la pérdida de carga total permitida. Para dimensionar inicialmente los diámetros de la tubería, las cargas de velocidad y las pérdidas de carga menores se suponen cero, pero se contabilizará más adelante al calcular la altura de las mangueras de distribución. El diámetro de cada tubería se puede determinar mediante el caudal determinado inicialmente, la longitud conocida de la tubería y pérdida de carga admisible calculada para cada componente de la tubería en la ecuación de pérdida por fricción y la resolución en términos de diámetro.

Las pérdidas por fricción en los tubos de suministro afectan los caudales. Estas pérdidas deben estimarse y manipularse mediante la selección adecuada del diámetro del tubo. Para tubos lisos de pequeño diámetro (menores a 128 mm), se puede combinar las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Blasius para predecir la pérdida de

carga por fricción, con precisión en tubos para el sistema por borbulleamiento (Keller y Bliesner, 1990).

Para $2000 < Re < 10^5$

$$hf = K \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} L \quad (1)$$

Donde:

- hf = Pérdidas de carga por fricción (m)
- Q = Flujo dentro del tubo (l/s)
- D = diámetro interior (mm), para tuberías menores a 128 mm de diámetro
- L = longitud de la tubería (m)
- $K = 7,89 \times 10^5$ para unidades métricas y para la temperatura del agua a 20°C

$$Re = 126943 * \frac{Q}{D} \quad (2)$$

Siendo, Q , caudal que pasa por la tubería en m^3/s y D , diámetro de la tubería en metros, todo esto asumiendo un valor para la viscosidad cinemática del agua a 20 °C igual a $1,003 \times 10^{-6} m^2/s$.

Watters y Keller (1978), también señalan que el flujo en las tuberías de riego es típicamente turbulento en aguas arriba y alcanza flujo laminar en la corriente de aguas abajo, el flujo en las tuberías disminuye. Sin embargo, las fórmulas de flujo turbulento todavía son utilizado en las secciones de flujo laminar de las tuberías porque el flujo y velocidades son tan bajas en las secciones aguas abajo que las pérdidas son insignificantes.

3.5.2. Coeficiente de reducción de Christiansen

El coeficiente de reducción de Christiansen (1942), F , es comúnmente utilizadas para calcular pérdidas de carga en múltiples salidas de tuberías y dimensionar inicialmente los diámetros de las líneas principales, líneas de derivación y laterales. Aplicar el coeficiente de reducción de Christiansen en las ecuaciones de pérdida de carga simplifica los cálculos para tuberías de múltiples salidas, estimando la pérdida por

fricción a lo largo de toda la longitud de la tubería de salidas múltiples. El factor de Christiansen se basa en las suposiciones de que el agua se lleva hasta el final de la línea y que las múltiples salidas están espaciadas uniformemente con la misma descarga.

Cuando se usa el coeficiente de Christiansen, el total de la pérdida por fricción para una tubería de salida múltiple se expresa como:

$$h_f = F h_f' \quad (3)$$

Donde:

- h_f = Pérdida de carga por fricción entre aguas arriba y extremos de aguas abajo de una tubería de salidas múltiple (m)
- F = Coeficiente de reducción de Christiansen que depende del número de puntos de salida a lo largo de la tubería, (Tabla 1)
- h_f' = Pérdida por fricción en un tramo de tubería suponiendo que no hay salidas a lo largo de la tubería (m)

Tabla 1. Coeficiente de reducción de Christiansen

Número de salidas	F		Número de salidas	F	
	fin	medio		final	medio
1	1	1	8	0,42	0,38
2	0,64	0,52	9	0,41	0,37
3	0,54	0,44	10 - 11	0,40	0,37
4	0,49	0,41	12 - 15	0,39	0,37
5	0,46	0,40	16 - 20	0,38	0,36
6	0,44	0,39	21 - 30	0,37	0,36
7	0,43	0,38	> 31	0,36	0,36

Fuente: Keller y Bliesner (1990).

Como indica la tabla 1, Christiansen factoriza a la mitad el espacio para la primera salida es menor que para la longitud total del espaciamento, reduciendo así la pérdida total por fricción en el lateral. Para el diseño de sistemas por borboleamiento, cualquier ahorro de carga es fundamental, y el diseño de medio espacio se recomienda para minimizar la pérdida de carga y utilizar el área de campo de manera más eficiente para cultivos de huerta.

3.5.3. Esclusas de aire en tuberías de baja presión

Las esclusas de aire se encuentran a menudo en flujos por gravedad de sistemas de baja presión donde las bolsas de aire pueden acumularse en la cresta de ondulaciones de la tubería. Estas bolsas de aire absorben una significativa cantidad de energía y puede bloquear parcial o totalmente el flujo de agua. Cuando el flujo está completamente bloqueado por aire, el agua se descargará hasta que se elimine el aire en la tubería.

Instalación de válvulas de alivio de aire o tubos verticales aguas abajo de la cresta de las ondulaciones de la tubería es el método más común para liberar las acumulaciones de aire en las líneas de agua. Sin embargo, instalar válvulas de aire en sistemas por borbulleamiento no es una solución práctica o económica.

Para evitar que se produzcan esclusas de aire en tuberías de pequeño diámetro, Harrington (1971), sugiere lo siguiente:

Para evitar las esclusas de aire:

- Eliminar las ondulaciones de la tubería.
- Mantener la línea de nivelación hidráulica por encima de la línea de la tubería.
- Asegurarse de que no entre aire por la entrada de la tubería.
- Asegurarse de que el flujo de la tubería sea suficiente para descargar aire en la tubería en las peores condiciones.

Para aliviar las esclusas de aire:

- Proporcionar salidas, válvulas de aire o tubos verticales, en ubicaciones críticas a lo largo de las tuberías.
- Organizar el suministro de agua para que las presiones más altas se puede introducir al inicio de la operación, y luego reduzca a la presión normal después de que todo el aire haya sido eliminado de las líneas.

Reynolds y Yitayew (1994), condujeron experimentos para el caudal de diseño que evite la formación de “bolsas de aire” para emisores (mangueras de distribución) con

un diámetro interno entre 6 y 12,5 mm. Los resultados de esos experimentos se plasmaron en una ecuación mediante regresión lineal:

$$Q_e = Q_{adh} = b * D^{2,41} \quad (4)$$

Donde, Q_e es el caudal del emisor (l/s), D es el diámetro interior del emisor (mm), b es un factor de conversión (0,000101). Por lo tanto, para prevenir la formación de aire dentro de los emisores se recomienda que el caudal de diseño sea mucho mayor al obtenido mediante la ecuación 4.

3.5.4. Consideraciones básicas de diseño

El objetivo del diseño de riego por borboleamiento es para dimensionar los diámetros de las tuberías para entregar un igual volumen de agua a cada planta, manteniendo la fricción total y pérdidas menores de carga, menor que la carga disponible en la fuente de agua.

Para determinar un mejor diseño, se requiere un conocimiento profundo del diseño hidráulico, principios de los sistemas por borboleamiento y el ingenio debe siempre emplearse para mantener bajos los costos y los diseños flexibles. Por lo general, cuanto más simple sea el diseño, menor será el costo de los materiales. Por ejemplo, minimizar el número de líneas de derivación y laterales, que comprenden una parte importante del total de los costos del material.

El polietileno corrugado, polietileno liso y policloruro de vinilo son los materiales de tubería más comúnmente utilizados. Para los laterales se debe tener cuidado al diseñar el sistema con diámetros internos de tubería que son disponible comercialmente en el país. Además, el uso de tubería de polietileno corrugado con compuerta puede no ser práctica para diseños con cargas muy bajas en terrenos llanos, porque las pérdidas por fricción para este tipo de tubería son mucho más grandes y las pequeñas ondulaciones de las tuberías puede causar esclusas de aire en los laterales.

Otra consideración importante con respecto al material, es el tipo de conexión utilizada para conectar las mangueras de distribución a los laterales. El tipo de conexión elegido a menudo está sujeto a la disponibilidad de materiales en una localidad en particular porque las conexiones comerciales no suelen estar disponibles.

Debido a que los sistemas por borbotamiento se basan en el flujo por gravedad, la pendiente del campo es otro factor crucial en el diseño. El diseño para sistemas ubicados en terreno llano y aquellos en pendientes graduales difieren ligeramente porque las alturas máximo y mínimas de las mangueras de distribución se producen en diferentes puntos a lo largo del lateral. Además, los sistemas en pendientes graduales ganan energía, y esto permite que los laterales sean más largos que en terreno llano, y también permite una mayor flexibilidad en el diseño. En consecuencia, los diseños en terreno llano no ganan energía, las longitudes laterales no pueden ser tan largas como en suelos con pendiente y la flexibilidad del diseño es limitada.

Otra gran diferencia en el diseño de sistemas por borbotamiento y otros sistemas de micro irrigación, es que los flujos son asumidos al comienzo del diseño, y estos caudales si se ejecutan continuamente, suelen ser mucho mayores que el pico de requerimiento de agua de cualquier cultivo. Por el contrario, los sistemas por aspersión y goteo suelen estar diseñados para funcionar de forma continua, el período de consumo máximo y sus caudales de diseño se calculan al principio de diseño. Por lo tanto, los sistemas por borbotamiento tienden a operar con menos frecuencia que los sistemas de riego por aspersión o por goteo porque sus caudales de diseño son mucho mayores.

3.5.5. Diseño del sistema en suelos a nivel

Para sistemas en terreno llano, las tuberías de riego tienen cero pendientes y se debe determinar la pérdida por fricción permisible. El método de porcentaje de altura se utiliza para dimensionar el lateral y diámetros de manguera de distribución porque existe una relación entre pérdidas en estos componentes. La pérdida de carga permitida para el lateral y los emisores, es la presión de entrada del lateral menos la

manguera de distribución a mínima altura. Para propósitos de diseño, se deben considerar dos casos para determinar el porcentaje de pérdida de carga admisible asignado a las mangueras de distribución y los laterales.

El caso I, es para cargas de diseño bajas, o cuando la presión de entrada del lateral es menos del doble del máximo de altura de la manguera de distribución menos la altura mínima de la manguera de distribución. En diseños anteriores de este tipo, el 50% de la pérdida de carga permitida por fricción se asigna generalmente a los laterales y el otro 50% asignado a las mangueras de distribución.

El caso II, es para cargas de diseño superiores, o cuando la presión de entrada lateral es mayor que el doble del máximo de elevación de la manguera de distribución menos la elevación mínima de la manguera de distribución. En este caso, la pérdida de carga admisible por fricción para el lateral debe ser la elevación máxima de la manguera de distribución menos la elevación mínima de la manguera de distribución. La pérdida de carga permitido por fricción de la manguera de distribución debe ser la presión de entrada lateral menos la máxima elevación la manguera de distribución.

Para sistemas por borbulleamiento en terreno llano, la reducción del diámetro del lateral en la dirección aguas abajo no se recomienda debido a la posibilidad de deposición de sedimentos a largo plazo en la sección aguas arriba del lateral. Como explica, Rawlins (1977), reduciendo el diámetro de la parte aguas abajo del lateral reducirá el flujo total en el lateral durante los períodos de rubor, disminuyendo así velocidades en la sección aguas arriba del lateral. A no ser que el sistema puede lavarse por medios distintos de la gravedad, la deposición de sedimentos en los laterales aumentará si los diámetros de tubería se reducen aguas abajo. Además, el ahorro del costo potencial asociados con la reducción de los diámetros laterales a nivel el terreno es mínimo porque estos laterales suelen ser cortos.

3.6. Diseño agronómico

El diseño agronómico es la base fundamental para efectuar los cálculos y decisiones posteriores y donde el mejor aprovechamiento del agua pasa por el conocimiento del movimiento y distribución de la misma en el perfil de los suelos regados (Gispert y Joan, 2008).

El diseño agronómico representa la primera fase del procedimiento de diseño de cualquier tipo de riego, con el que se determina la cantidad de agua que ha de transportar la instalación, correspondiente a las necesidades brutas de riego en las épocas de máxima necesidad. Que tiene por finalidad garantizar que la instalación sea capaz de suministrar la cantidad suficiente de agua, con un control efectivo de las sales y una buena eficiencia en la aplicación del agua. Se desarrolla en dos fases: cálculo de las necesidades de agua y determinación de los parámetros de riego (dosis, intervalo entre riegos, caudal necesario, duración de riego, número de emisores y disposición de los mismos) (Fuentes, 2004).

Fuentes (2000), Señala que, para realizar el diseño agronómico, primero debemos tomar varios datos del suelo donde se va a instalar el sistema de riego, por lo que se debe proceder a ejecutar una calicata del cual se tomarán muestras para ser llevadas a laboratorio y así poder determinar los parámetros de textura, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

3.6.1. Parámetros físicos e hidro físicos del suelo

a. Textura del suelo

La proporción relativa de arena limo y arcilla, juega un papel muy importante en la velocidad de infiltración, retención y la forma de distribución del agua, es así que en suelos arenosos el agua forma un bulbo de características alargada y en suelos arcillosos el movimiento se realiza en mayor proporción horizontalmente (Ortiz, 1984).

b. Densidad aparente

La densidad aparente es una de las características del suelo que reviste mayor importancia. Se tiene en cuenta para conocer el espacio poroso, transformar la humedad gravimétrica, estimar el coeficiente de expansión lineal, en fertilidad para calcular la masa de la capa arable y en riegos para calcular la lámina de agua. También, se utiliza como parámetro para clasificar los suelos orgánicos y derivados de cenizas volcánicas (Santos y Picornell, 2010).

c. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Se denomina capacidad de campo (CC), a la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener luego de ser saturado y dejado drenar libremente evitando evapotranspiración y hasta que el potencial hídrico se estabilice. El agua ocupando el espacio de los macro poros drena hacia capas inferiores bajo la fuerza de gravedad, los microporos se llenan de agua y los más grandes de aire y agua. El punto a capacidad de campo corresponde a una succión de 1/3 bares, las plantas deben producir una succión hasta 15 bares como máximo. A los 15 bares de succión la cantidad de agua en el suelo se denomina el punto de marchitez permanente (PMP). A ese punto las plantas pierden la capacidad de succión y siguen perdiendo agua mediante la transpiración. Se pierde la turgencia de la planta resultando en su marchitez. Gráficamente la diferencia entre el punto de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente resulta en el agua disponible para el cultivo en mm o expresado porcentualmente. La textura del suelo influencia en la cantidad de agua en un suelo drenado hasta el punto de capacidad de campo y la cantidad que está disponible para las plantas (FAO, 2017).

d. Infiltración del suelo

El comportamiento del agua en el suelo depende de propiedades particulares y de las fuerzas que actúan sobre ellas. Estas a su vez dependen, de la geometría de los poros y de la interacción entre el agua y las superficies sólidas con las que está en contacto. La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie

del suelo y llega hasta sus capas inferiores. Por otro lado, permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Finalmente, la percolación es cuando el agua aplicada sobre la superficie del suelo se infiltra, pasa poco a poco hacia capas más profundas (Jácome, 2009).

3.6.2. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia (ET_o) representa la evaporación de un cultivo de hierba bien regada. Las necesidades de agua de otros cultivos están directamente vinculadas a este parámetro climático. Aunque existen varios métodos para determinar la ET_o, el método de Penman-Monteith se recomienda como método de combinación adecuada a partir de datos climáticos tales como: Temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento e insolación. Los datos climáticos se deben recoger de la estación meteorológica más cercana y más representativa. La ET_o puede ser determinada utilizando la ecuación de la FAO Penman-Monteith (Allen, *et al.*, 2006).

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta(Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * V^2(ea - ed)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 * V^2)} \quad (5)$$

Dónde:

- ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día⁻¹)
- R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)
- G = Flujo del calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹)
- T = Temperatura diaria media (°C)
- γ = Constante psicométrica (kPa °C⁻¹)
- V₂ = Velocidad de viento a 2 m del suelo (m s⁻¹)
- (ea–ed) = Déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

3.6.3. Evapotranspiración del cultivo

El agua que se encuentra disponible en el suelo se agota por el consumo de las plantas, por la evaporación superficial y por el drenaje, la suma de la transpiración y evaporación se conoce como evapotranspiración, para conocer la evapotranspiración del cultivo se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$Etc = ET_o * Kc \quad (6)$$

El Kc depende de las características del cultivo, el ritmo de desarrollo y ciclo de crecimiento del cultivo.

3.6.4. Evapotranspiración reducida

Se refiere a la evapotranspiración de cultivo bajo condiciones propias del lugar y del cultivo, se determina en base a la siguiente ecuación:

$$ET_{cred} = ET_c * K_r \quad (7) \qquad K_r = \frac{P}{100} * 1,1 \quad (8)$$

Donde:

- ETcred = Evapotranspiración reducida (mm/día)
- Kr = Coeficiente de reducción
- P = Porcentaje de sombreado

3.6.5. Lámina de agua

Es la lámina de agua que se va a reponer en el suelo para reponer su humedad, se determinó en base a la siguiente ecuación:

$$La = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) * \frac{Dap}{Dw} * Pr * C \quad (9)$$

Donde:

- La = Lámina de agua (cm)
- CC = Contenido de humedad del suelo a capacidad de campo (% masa)
- PMP = Contenido de humedad del suelo a punto de punto de marchitez (% masa)
- Dap = Densidad aparente del suelo (g/cm³)

- Dw = Densidad del agua (g/cm³)
- Pr = Profundidad de raíces del cultivo (cm)
- C = Criterio de riego

3.6.6. Frecuencia de riego

El intervalo o frecuencia de riego, es el tiempo que transcurre entre el inicio de dos riegos sucesivos, se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{La}{ET_c} \quad (10)$$

Donde:

- Fr = Frecuencia de riego (días)
- La = Lámina de agua (mm)

3.6.7. Lámina neta de riego

Es la lámina de agua que se va a reponer en el suelo para reponer su humedad, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Zn = ET_{cred} * Fr \quad (11)$$

Donde:

- Zn = Lámina neta de riego (mm)
- Fr = Frecuencia de riego (días)

3.6.8. Lámina bruta de riego

Para determinar la lámina bruta de riego se calcula con la siguiente ecuación:

$$Zb = \frac{Zn}{Ea} \quad (12)$$

Donde:

- Zb = Lámina bruta de riego (mm)
- Ea = Eficiencia de aplicación

3.6.9. Volumen bruto por árbol

Es la cantidad de agua que se aplica en cada riego, se puede expresar como lámina, altura o volumen de agua, se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$Vba = Zb * (Sp * Sr) \quad (13)$$

Donde:

- Vba = Volumen bruto por árbol (l)
- Sr, Sr = Espacio entre hileras y plantas (m)

3.6.10. Tiempo de riego

Es el tiempo de riego necesario para aplicar agua al suelo para cumplir las necesidades requeridas por el cultivo, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Tr = \frac{Vba}{Qdh * 60} \quad (14)$$

Donde:

- Tr = Tiempo de riego (min)
- Qe = Caudal del emisor (l/s)

3.7. Diseño hidráulico

El diseño hidráulico comprende todos los cálculos de los diferentes componentes de la instalación, para que se adapten a las condiciones de presión y caudal disponibles, de forma que a los emisores llegue el agua a la presión nominal y caudal nominal de los mismos, buscando la solución más económica dentro de unas calidades garantizadas (Moya, 2009).

Con el diseño hidráulico se determinarán las dimensiones de todos los componentes del sistema de riego, de forma que se pueda aplicar el agua suficiente para los cultivos durante cualquiera de sus fases de desarrollo, también es conseguir que la aplicación del agua sobre el suelo sea suficientemente uniforme. Con todo ello se podrán obtener buenas producciones con el menor gasto de agua (Fernández *et al.*, 2010).

Así mismo señala que es preciso tener en cuenta el valor de uniformidad de aplicación que se utilizará en el proceso de diseño ya que optando por una uniformidad alta, se estará eligiendo una instalación de riego que ahorrará agua e incrementará la producción de los cultivos, lo que siempre es necesario, pero también será mayor el coste de la instalación ya que las presiones deberán ser más uniformes, mayores los diámetros de tuberías, se necesitará mayor longitud de tuberías y serán necesarios reguladores de presión.

3.7.1. Determinación de la distribución del campo

Los factores de diseño del sistema incluyen la variación debido a la topografía de campo, las propiedades hidráulicas del suelo y la programación del riego (Schwankl y Hanson, 2007), se debe considerar los siguientes aspectos:

- Longitud del campo (L)
- Ancho de campo (W)
- Pendiente del campo (SI)
- Pendiente transversal del campo (Sw)

El plano de campo y los perfiles deben inspeccionarse con precisión y los levantamientos de elevación con un error de unas pocas pulgadas afectarán las elevaciones de la manguera de distribución y también afectara la uniformidad del flujo a través del sistema. Para diseños de suelo nivelado, el dispositivo de carga constante ubicados en el medio del campo reducirá la acumulación de errores de pérdida por fricción ya que los laterales son más cortos, y la carga de diseño se puede distribuir más fácilmente por igual a cada sección del campo.

3.7.2. Selección de criterios de diseño

Los siguientes criterios de diseño deben seleccionarse antes de continuar con el diseño estas pueden estar sujetas al criterio del diseñador, dentro de ciertos límites:

- Tipo de cultivo y espaciamiento
 - Espacio entre planta S_p (m)

- Espacio entre hileras de árboles S_r (m)
- Espaciamiento entre laterales S_l (m)
- Espacio entre emisores S_e (m)
- Elevaciones máximas y mínimas de la manguera de distribución H_{max} y H_{min} respectivamente (m)
- Caudal de diseño de la manguera de distribución Q_e (l/s)

a. Espaciamientos

Los espaciamientos entre plantas dependen del tipo de cultivo y los espacios de los laterales y emisores deben ajustarse al espacio entre plantas. Un lateral colocado a medio camino entre las filas de árboles tendrá un espaciado lateral que es igual a el doble del espaciado entre filas, el espaciamiento entre emisores es igual al espaciamiento entre plantas. Se tiene que tomar en cuenta que esta configuración asume que del lateral entre las filas de árboles hay dos mangueras de distribución que están colocados uno al lado del otro para actuar como emisores y para regar árboles a ambos lados del lateral.

b. Flujo de diseño de la manguera de distribución

Los caudales de diseño para las mangueras de distribución, Q_e , son una función del diámetro mínimo de manguera requerido para evitar pérdidas excesivas por fricción y obstrucciones; orificio máximo diámetro para asegurar la uniformidad de la descarga; y velocidad de flujo para eliminar el aire de las tuberías. El diámetro de la manguera se elige en función de los diámetros de orificio habituales menor a 10 mm. El flujo de manguera de distribución común con caudales de 0,032 o 0,047 l/s para 10 mm de diámetro se ha utilizado en diseños de sistemas por borboleamiento anteriores.

3.7.3. Diseño y cálculo de los componentes del sistema

Los componentes de un sistema por borboleamiento incluyen la línea principal, el dispositivo de carga de agua constante, líneas de derivación, laterales y mangueras de distribución. El diseño de estos componentes debe ser determinado antes de que

se puedan elegir los diámetros de la tubería, y los factores críticos para determinar el diseño son la ubicación de la fuente de agua y la pendiente del campo.

3.7.3.1. Diseño del dispositivo de carga constante

Si la fuente de agua no opera a una altura constante, un dispositivo que mantenga el agua a una altura constante debe ser instalado cerca de la fuente de agua o en algún lugar a lo largo de la tubería de línea principal para proporcionar una carga de diseño constante durante la operación. Los dispositivos de carga constante pueden ser considerados por un diseñador, dependiendo de las condiciones del sitio.

Uno de los factores críticos que afectan la uniformidad del flujo en los sistemas por borbotamiento está en operar el sistema con una carga de agua diferente de la carga de diseño, tal operación resultará en diferentes caudales para cada manguera de distribución y afectará gravemente a la uniformidad de todo el sistema. Las fluctuaciones por encima o por debajo de la carga de diseño deben mantenerse al mínimo para mantener altos valores de uniformidad de flujo.

3.7.3.2. Cálculo de la longitud y número de tuberías

a. Longitud de las tuberías

Longitud de la línea de derivación

$$L_d = \frac{W}{2} - S_r \quad (15)$$

Longitud de los laterales

$$L_l = L - \frac{S_p}{2} \quad (16)$$

Longitud de las mangueras de distribución (emisores)

$$L_e = \frac{S_r}{2} + d_l + H_{max} \quad (17)$$

b. Número de tubos y arboles

Número de mangueras de distribución por lateral

$$N_e = \frac{2 * L}{S_e} \quad (18)$$

Número de laterales

$$N_l = \frac{W}{2 * S_r} \quad (19)$$

Número total de árboles

$$N_t = N_e * N_l \quad (20)$$

Donde:

- Ld = Longitud de la línea de derivación (m)
- Ll = Longitud lateral (m)
- Le = Longitud de la manguera de distribución (m)
- W = Ancho del campo (m)
- L = Longitud del campo (m)
- Sr = Espacio entre filas (m)
- Sp = Espacio entre plantas (m)
- dl = Profundidad de entierro del lateral (m)
- Hmax = Altura máxima de la manguera de distribución (m)
- Hmin = Altura mínima de la manguera de distribución (m)
- Ne = Número de mangueras de distribución por lateral
- Se = Distancia entre mangueras de distribución (m)
- Nl = Número de laterales
- Nt = Número total de árboles

Generalmente, se asume que todas las mangueras de distribución en un sistema tienen la misma longitud; y se debe considerar que las alturas máximas y mínimas se encuentren entre un metro y 0,3 metros respectivamente, mangueras de distribución

colocadas en elevaciones inferiores a 0,3 metros existen riesgo de daños por estancamiento de agua o pisoteo por trabajadores o animales, y mangueras de distribución establecidas en alturas superiores a un metro, con el efecto de la caída de agua causarían erosión del suelo en el punto de impacto. Una forma de aumentar las alturas de las mangueras de distribución sin aumentar la erosión del suelo es colocar una T en el punto de descarga de la manguera de distribución (Reynolds *et al.*,1995).

3.7.3.3. Cálculo de la tasa de flujo de diseño para las tuberías

Los caudales de diseño de las tuberías se calculan a partir de caudal de la manguera de distribución

Caudal del lateral

$$Q_l = Q_e * N_e \quad (21)$$

Caudal de la línea de derivación

$$Q_d = Q_l * N_l \quad (22)$$

Tasa de flujo principal

$$Q_s = N_t * Q_e \quad (23)$$

Donde:

- Q_e = Caudal de la manguera de distribución (emisor) (l/s)
- Q_l = Caudal lateral (l/s)
- Q_d = Caudal de la línea de derivación (l/s)
- Q_s = Tasa de flujo principal (l/s)

3.7.3.4. Selección de los diámetros de tubería

Keller y Bliesner (1990), señalan que varios diseñadores utilizan diferentes métodos para dimensionar los componentes y redes de tuberías de microriego, que incluyen:

a. Método económico: Se selecciona el tamaño de la tubería más económico cuando se basa en los costos de bombeo a largo plazo.

b. Método de pérdida de carga de la unidad: Se establece un límite de pérdida de carga por unidad de longitud de tubería.

c. Método de velocidad: Se establece un límite en el flujo de velocidad.

d. Método de pérdida de carga porcentual: Se establece un límite de pérdida de carga por fricción para cada tubería.

El método de velocidad y el método de pérdida de carga porcentual a menudo se utilizan para dimensionar tuberías para sistemas por borboleamiento. El método de velocidad es útil para dimensionar el diámetro mayor de tuberías como la línea principal y la línea de derivación, porque a largo plazo la deposición de sedimentos en las tuberías de gran diámetro es una preocupación importante.

El valor de 0,6 m/s en los laterales fue recomendado por Rawlins (1977) y Worstell (1975), para prevenir deposición de sedimentos cargados de limo de las aguas de riego en los laterales. Esta velocidad es suficiente para transportar el sedimento como carga suspendida en un caso dado depende de la distribución del tamaño de partículas del material.

A veces, las tuberías deben diseñarse con velocidades de flujo menores de 0,3 m/s para evitar una pérdida excesiva por fricción. En tales condiciones, puede ser necesario construir una trampa de sedimentos a lo largo de la línea principal o para limpiar el sistema y mantener la capacidad de diseño. Además, válvulas o tapas al final de cada línea de derivación y lateral para fines de descarga.

3.7.3.4.1. Ecuación de pérdida de carga por fricción

La pérdida por fricción para la línea principal, línea de derivación, laterales y mangueras de distribución, para tuberías lisas pueden ser calculadas mediante la ecuación combinada de Darcy-Weisbach y Blasius, esta es una ecuación para tuberías lisas de diámetros menores a 128 mm:

$$h_f = 7,89 \times 10^5 * F * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} * L \quad (1)$$

Donde:

- h_f = Pérdida de carga (m)
- F = Coeficiente de Christiansen
- Q = Caudal (l/s)
- D = Diámetro (mm)
- L = Longitud de la tubería (m)

3.7.3.4.2. Pérdida de carga admisible

El gradiente de pérdida de carga admisible está determinado por la siguiente ecuación tanto para diseños de terreno llanos como para pendientes graduales:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{(H_u - H_{do}) - \Delta Z}{FL} = \frac{(h_f)_a}{FL} \quad (24)$$

Donde:

- h_f/L = Gradiente de pérdida de carga (m/m)
- H_u = Altura de presión aguas arriba (m)
- H_{do} = Altura de presión aguas abajo (m)
- Δz = Cambio de elevación entre aguas arriba y aguas abajo (m)
- $(h_f)_a$ = Pérdida de carga admisible en la tubería (m)
- F = Factor de Christiansen

3.7.3.4.3. Dimensionamiento de la línea de derivación, lateral y manguera de distribución

El diseño de estos sistemas procede desde la fuente de agua hasta el extremo distal del campo, primero la línea principal se dimensiona con respecto a la carga disponible y la carga de diseño, a continuación, la línea de derivación y finalmente, los laterales y las mangueras de distribución se dimensionan simultáneamente. Keller y Karmeli (1974), indican que cuando se utiliza un método de porcentaje de altura para dimensionar las líneas de derivación, el diseño más económico es con aproximadamente el 55% de la pérdida de carga en los laterales y el 45% en la línea de derivación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este criterio de diseño

para sistemas presurizados no es aplicable a los sistemas por borbulleamiento porque el gradiente de presión es pequeño y las mangueras de distribución consumen un gran porcentaje de la carga de diseño. Por lo tanto, la pérdida de carga admisible en la línea de derivación del sistema por borbulleamiento debe ser inferior a 45% de la carga de diseño. Los diseños de borbulleamiento anteriores han demostrado que la pérdida de carga de la línea de derivación debe ser el 20% o menos de la carga de diseño.

Las pérdidas por fricción en la línea de derivación deben calcularse para determinar la presión de entrada para cada lateral, en este caso las elevaciones de las mangueras deberán calcularse por separado para cada lateral porque la presión de entrada para cada lateral será diferente.

Una forma sencilla de minimizar los cálculos de elevación para la manguera de distribución es asumir que las pérdidas por fricción de la línea de derivación son 50% o menos de la carga de diseño. Esta suposición aumentara el diámetro de la línea de derivación, pero las pérdidas por fricción de la línea de derivación pueden despreciarse, permitiendo que todos los laterales a lo largo de la línea de derivación tienen la misma presión de entrada. Por lo tanto, los cálculos de elevación de la manguera para un lateral se pueden aplicar a todos los laterales conectados a la misma línea de derivación, y el número de los cálculos de elevación de la manguera se reducirán por el número de laterales conectados a la línea de derivación. Esta suposición debería evitarse para líneas de derivación largos con cinco o más laterales, porque el aumento en el diámetro de la línea de derivación será caro.

3.7.3.4.4. Pérdidas menores

Todas las pérdidas menores entre la fuente de agua y el punto de descarga deben ser contabilizados, incluidas las entradas de tuberías, codos, tes, reductores y válvulas.

$$h_{ml} = C_L * \frac{V^2}{2 * g} \quad (25)$$

Dónde, C_L = Coeficiente de pérdida en varios accesorios de tubería. Keller y Bliesner (1990) dan una lista completa de coeficientes de pérdida, y algunos de los valores C_L comunes para los sistemas por borboleamiento se encuentran en la tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de pérdida comunes, C_L , para sistemas por borboleamiento.

Accesorios	C_L
Te	0,9
Codos	0,9
válvula de compuerta (completamente abierta)	0,2
válvula de compuerta (3/4 abierta)	1,0
válvula de compuerta (1/2 abierta)	5,6
válvula de compuerta (1/4 abierto)	24,0

Fuente: Keller y Bliesner (1990).

3.7.3.5. Cálculo de las elevaciones de la manguera de distribución

Después de que los diámetros de la tubería lateral y de la manguera de distribución sean determinados, se debe calcular la elevación de las mangueras de distribución, esta se puede calcular mediante las ecuaciones de pérdida por fricción. Las mangueras de distribución están ancladas a un árbol o estaca, estas alturas se ajustan para que el agua salga de todas las mangueras a tasas iguales.

3.7.3.6. Trazado del diagrama piezométrico

Una vez obtenida las elevaciones de las mangueras de distribución se debe realizar un diagrama piezométrico trazando las elevaciones de la manguera de distribución en el perfil de la tubería de los laterales.

3.8. Evaluación del sistema de riego

Estas evaluaciones se realizan para ver el desempeño del sistema, es decir para conocer la distribución y la cantidad de agua aplicada, lo que permitirá realizar mejoras en el sistema, lo más recomendable es realizar pruebas de campo bajo condiciones reales de operación.

Las evaluaciones se pueden realizar mediante el registro del volumen de agua, que sale por cada emisor evaluado. Esta medición se realiza mediante un recipiente graduado, en un tiempo determinado o bien con pluviómetro. Existen varios índices para evaluar el desempeño de los sistemas de riego.

La uniformidad de la aplicación de agua se calcula mediante los coeficientes de uniformidad Christiansen (CUC) por presentar resultados muy fiables (Bernardo *et al.*, 2009) y por el coeficiente de uniformidad de distribución (CUD) o uniformidad de emisión utilizado en sistemas de riego localizado, donde se selecciona el 25% de los más pequeños valores recolectados, permitiendo una medida más restringida, dando mayor énfasis a las plantas que reciben menos agua (López, 1992).

Coefficiente de uniformidad de distribución y coeficiente de uniformidad de Christiansen

$$CUD = \frac{Q_{25\%}}{Q_{100\%}} * 100 \quad (26)$$

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum |X_i - X_a|}{X_a * n} \right] * 100 \quad (27)$$

Donde:

- CUD = Coeficiente de uniformidad de distribución
- CUC = Coeficiente de uniformidad de Christiansen
- $Q_{25\%}$ = Caudal promedio de los caudales más bajos equivalente al 25% de los emisores
- $Q_{100\%}$ = Caudal promedio equivalente al 100% de los emisores evaluados
- X_i = Lámina de agua colectada en el recipiente i
- X_a = Lámina de media colectada
- n = Número de observaciones

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización

4.1.1. Ubicación

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la Estación Experimental de Sapecho dependiente de la Facultad de Agronomía - UMSA. En el municipio de Palos Blancos cuarta sección de la provincia Sud Yungas del departamento de La Paz, se encuentra localizado a 239 Km de distancia de la ciudad de La Paz (Chipana, 2015).

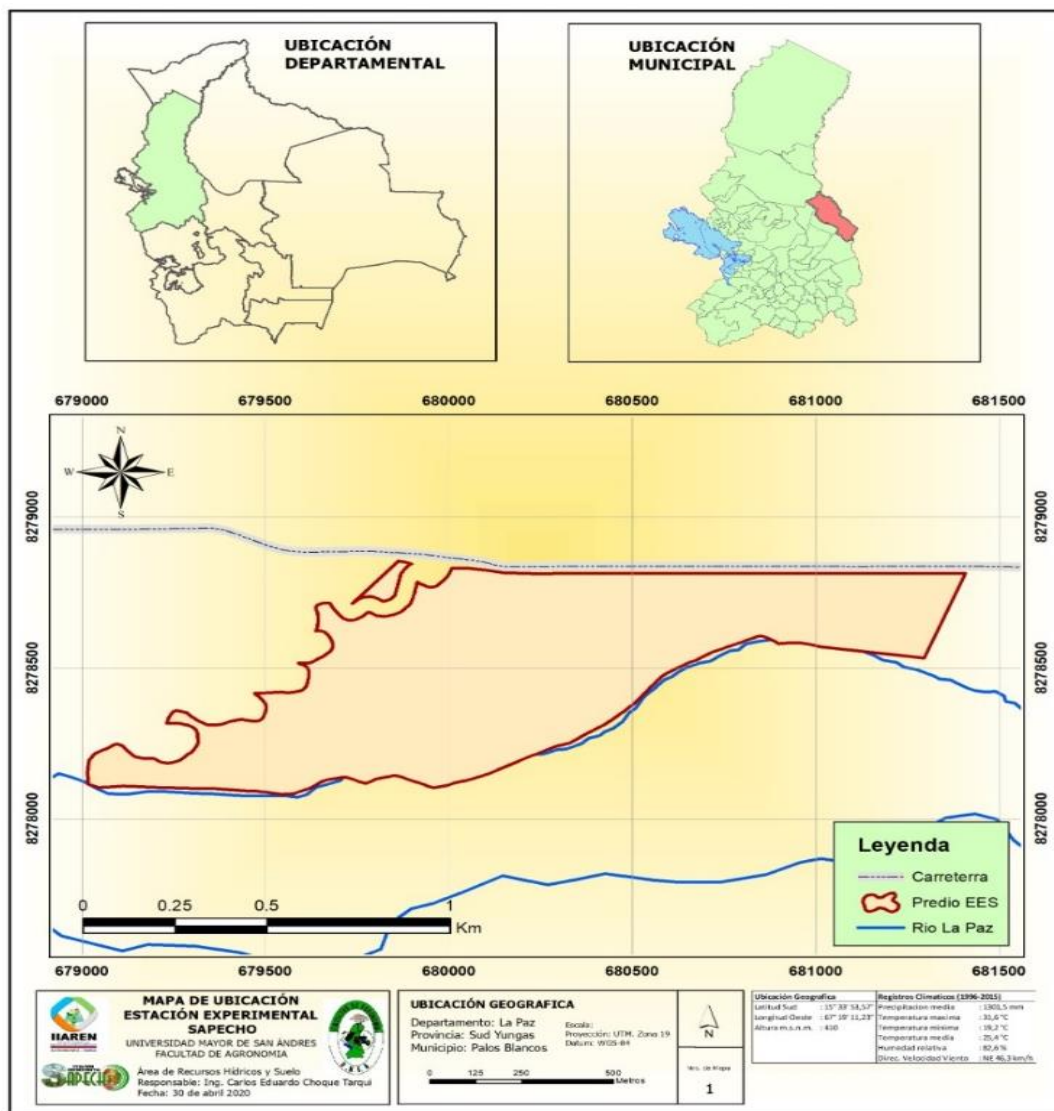


Figura 2. Ubicación de la Estación Experimental de Sapecho.

4.1.2. Latitud y longitud

La Estación Experimental de Sapecho se encuentra a una altitud promedio de 450 m.s.n.m., latitud Sur: 15°33'27,59", longitud Oeste 67°20'05,10", la región comprende las provincias de Caranavi y Larecaja (Vásquez, 2002).

4.2. Características climáticas

4.2.1. Clima

La Estación Experimental de Sapecho – Alto Beni, según los datos del SENAMHI (2019), está caracterizado por ser de clima cálido, con amplias variaciones estacionales, la temperatura media anual es de 26 °C, con valores mínimos de 16 °C y una máxima de 36 °C, es común la presencia de heladas entre los meses de julio y septiembre. La precipitación promedio en el área de estudio es de 1.500 mm con valores mínimos de 16,3 mm en agosto y máxima de 221,6 mm en enero y una humedad relativa promedio de 78%.

4.2.2. Topografía

La región de Alto Beni es una zona caracterizada por una topografía ondulada a muy ondulada, con colinas y valles que varían entre 300 a 1.400 metros de altura, a medida que se va alejando del río se incrementan las pendientes y se pueden evidenciar cambios climáticos, las pendientes pueden variar desde 0% de inclinación (cercanas al río) a 71% parcelas muy inclinadas (lejanas al río) (CUMAT - COTESU, 2001).

4.2.3. Fisiografía

Las características de la zona por la gran unidad fisiográfica de la cordillera y valles del sub andino, conformado por serranías y colinas paralelas entre sí donde se distinguen llanuras; esta llanura es de naturaleza aluvial comprende tres terrazas, la antigua, las subreciente, y la reciente. La zona de Sapecho se ubica en la terraza subreciente situada casi al nivel del río Alto Beni y limita con la parte inferior de la terraza antigua. El Alto Beni está constituido por un valle profundo con una altitud que

fluctúa entre 80 y 450 m.s.n.m. Por la profundidad del valle corre el río Alto Beni de sur a norte con numerosos afluentes. A la conclusión del valle nacen las sierras montañosas de Marimonos al este y la serranía de Bella Vista al oeste, con alturas que sobrepasan los 3.000 msnm, de manera que la profundidad del valle por una influencia geográfica constituye un microclima con altas temperaturas y precipitaciones que dan origen a un clima tropical semihúmedo (CUMAT - COTESU, 2001).

4.2.4. Suelo

Los suelos de Alto Beni presentan, al menos en parte, características aceptables de fertilidad para uso agrícola extensivo, sin embargo, son suelos muy delicados y susceptibles a una rápida erosión a causa de las excesivas pendientes que presenta su topografía y por la capa muy delgada de tierra fértil que tiene (CUMAT – CUTESU, 2001).

Los suelos de la zona del Alto Beni corresponden a la formación terciaria de areniscas rojas y arcillas con concreciones calcáreas. Las colinas y serranías del área de Sapecho están formadas de rocas sedimentarias que causa de la intemperización y transporte anterior a la orogénesis. Los suelos de las terrazas subreciente son de origen aluvial, textura que va desde franco arcillosa a franco areno limosa, son profundos y de pendiente suave libre de pedregosidad, con fertilidad moderada a buena, pH entre ligeramente ácido a neutro, los contenidos de humus en los suelos del bosque primario son elevados, proceso de la acumulación de materia orgánica de origen vegetal de muchos años. La tala y quema del bosque, y las labores agrícolas inadecuadas, hace que los niveles de humus y fertilidad del suelo disminuyen rápidamente, debido a la violenta mineralización y cambios del microclima edáfico y condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Villca, 1996).

Así mismo, la zona de Alto Beni presenta suelos del tipo aluvial, de textura franco arcilloso arenoso, con un pH ligeramente ácido a neutro (5,5 a 7). Estos suelos son de textura media y el subsuelo de textura más pesado de color rojizo (oxalato férrico), y una buena fertilidad. Los lugares escarpados son generalmente de poca profundidad

y se erosionan fácilmente. El drenaje deficiente del suelo es uno de los factores limitantes para el uso agrícola de más del 40% de estas tierras (Villca, 1996).

4.2.5. Vegetación

La vegetación de Alto Beni es clasificada en tres zonas Agroecológicas: Bosque de transición Amazónico (300 a 500 m), bosque Sub Montano (500 a 600 m), bosque Húmedo Montañoso (600 a 1.000 m). El “bosque húmedo subtropical” es siempre verde, relativamente alto y tupido, en algunas zonas todavía presenta bosques vírgenes. El “bosque muy húmedo subtropical”, presenta formaciones boscosas muy altas, tupidas y siempre verdes. El “bosque pluvial subtropical”, tiene formaciones arbóreas generalmente pequeñas y deformes, en trechos presenta una vegetación mayormente herbácea y arbustiva (CUMAT – CUTESU, 2001).

Existe en la región diversidad de especies vegetales desde árboles, arbustos, herbáceos, etc. La zona presenta alternativas de producción forestal como protección de bosque y la producción de madera. La vegetación que cubre los suelos: Ambaibo (*Cecropia concolor* willd), Motacú (*Attalea princeps*), Bálsamo (*Calophyllum brasiliense*), Palo santo (*Bursera graveolens*), etc. (PIAF, 2001).

La agricultura de la zona es muy variada, los cultivos de mayor son las siguientes Cacao (*Theobroma cacao*), Cítricos (*Citrus spp.*), Café (*Coffea arabica*), Bananos y Plátanos (*Musa sp.*), Arroz (*Oriza sativa*), Yuca (*Manihot esculenta*), Frejol (*Phaseolus vulgaris*) y Achiote (*Bixa orellana*) (PIAF, 2001).

4.3. Materiales y equipos

4.3.1. Material biológico

Para el presente trabajo de investigación se utilizó plantas de café de la variedad robusta, estas plantas se encontraban establecidas en la parcela agroforestal de café de la Estación Experimental de Sapecho dependiente de la Facultad de Agronomía - UMSA.

4.3.2. Material para el sistema de riego

- Tanque de 2.300 litros de capacidad
- Tuberías de polietileno de $\frac{3}{4}$ pulgadas de diámetro
- Tubería de PVC de $1 \frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro
- Te de Polipropileno de 4,9 mm de diámetro con púas
- Tapones de $1 \frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ pulgadas de diámetro
- Llave de paso de $1 \frac{1}{2}$ pulgada
- Manguera PVC de pared delgada de 4,9 mm de diámetro
- Collarines con reductor $1 \frac{1}{2} \times \frac{3}{4}$ de diámetro
- Pegamento PVC
- Teflones

4.3.3. Material de gabinete

Material de escritorio, equipo de computación y software.

4.4. Metodología

La metodología será con un enfoque cuantitativo tomando en cuenta que las variables de investigación serán cuantificables (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

4.4.1. Procedimientos para diseño del sistema de riego

Para el diseño del sistema de riego se siguió la metodología planteada por Fuentes (2004), quien plantea que para implementar un sistema de riego se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos: Recopilación de información básica, Diseño agronómico, Diseño hidráulico e Implementación.

4.4.1.1. Recopilación de la información básica

4.4.1.1.1. Superficie del área de estudio

El trabajo de investigación se desarrolló en una parcela que cuenta con un área de 792 m² que constituye una superficie de 0,079 ha.

4.4.1.1.2. Estudio del suelo

4.4.1.1.2.1. Análisis físico del suelo

Para realizar el análisis físico del suelo en el área de estudio, se realizó una calicata o pozo agrológico que permitió identificar las características morfológicas del suelo. Se tomaron muestras a dos profundidades 0 – 30 cm y 30 – 60 cm, y se identificaron los horizontes presentes, y posteriormente se analizaron en el laboratorio de suelos de la Estación Experimental de Sapecho donde se determinaron los siguientes parámetros:

a. Textura

La textura del suelo se refiere a la cantidad y tamaño de las partículas inorgánicas, para la determinación de este parámetro se utilizó el método del Hidrómetro o de Bouyoucos, el cual determina el porcentaje de Arcilla, Limo y Arena, y con ayuda del triángulo textural se determinó la textura del suelo del área en estudio.

b. Densidad aparente

Este parámetro se determinó en base a la siguiente ecuación:

$$Dap = \frac{mss}{Vt} \quad (28)$$

Donde:

- Dap = Densidad aparente (g/cm³)
- mss = Masa del suelo seco (g)
- Vt = Volumen total (cm³)

4.4.1.1.2.2. Propiedades hídricas del suelo

a. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Este parámetro hídrico se estimó en base al Software Soil Wáter de USDA (2006), es un programa que se utiliza para simular la tensión del agua del suelo, la conductividad y la capacidad de retención del agua según la textura del suelo.

b. Infiltración del suelo

Se realizó la prueba de infiltración en el campo, empleando el método de los cilindros infiltró metros, luego con los datos obtenidos se determinó la velocidad de infiltración básica. Las características de la infiltración de un suelo constituyen el elemento básico para poder efectuar un adecuado diseño del sistema de riego y determinar el tiempo de riego.

4.4.1.1.3. Calidad de agua

No se realizó el estudio de calidad de agua ya que la fuente de agua para el riego son los excedentes del sistema de agua, las cuales abastecen las necesidades para la aplicación de riego, por otro lado , la calidad de agua según los reportes de análisis de agua realizadas por la Estación Experimental de Sapecho, muestran que tiene un pH ligeramente ácido, los contenidos de sales y de RAS no presentan peligro, es decir se encuentran por debajo del rango aceptable, de esta manera se concluye que el agua aplicado es apta para el riego.

4.4.1.2. Diseño agronómico

a. Cálculo de la evapotranspiración de referencia

Para el cálculo de este parámetro se utilizó el software CROPWAT 8,0 que es un programa que utiliza el método de Penman-Monteith de la FAO (Allen, *et al.*, 2006), que es un programa de computación que puede ser usado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y los requerimientos de agua de los cultivos, y también permite la simulación del uso de agua por los cultivos bajo diferentes condiciones de clima, cultivos y suelo.

b. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo

Para determinar la evapotranspiración del cultivo se utilizó como referencia los coeficientes de cultivo (Kc) recomendados en el manual N° 56 de riego y drenaje de la FAO (1998), con los datos obtenidos se determinó la evapotranspiración del cultivo,

para el diseño se consideró el valor máximo del coeficiente del cultivo, este se determinó utilizando la ecuación 6.

c. Evapotranspiración reducida

La evapotranspiración reducida del cultivo se determinó utilizando la ecuación 7, el cálculo del coeficiente de cobertura del cultivo se determinó con las características propias del cultivo en el sitio de estudio, este se determinó con la ecuación 8.

d. Frecuencia de riego

La frecuencia de riego del cultivo se determinó en base a la relación agua, suelo, planta y clima, se determinaron mediante las ecuaciones 9 y 10.

e. Lámina neta y bruta de riego

La lámina neta y bruta de agua requerida por el cultivo se calculó utilizando las ecuaciones 11 y 12, para la eficiencia de riego se tomó un valor igual al 85%.

f. Cálculo del volumen bruto por árbol

Para determinar el volumen bruto de agua que se debe aplicar a cada planta se consideró la ecuación 13.

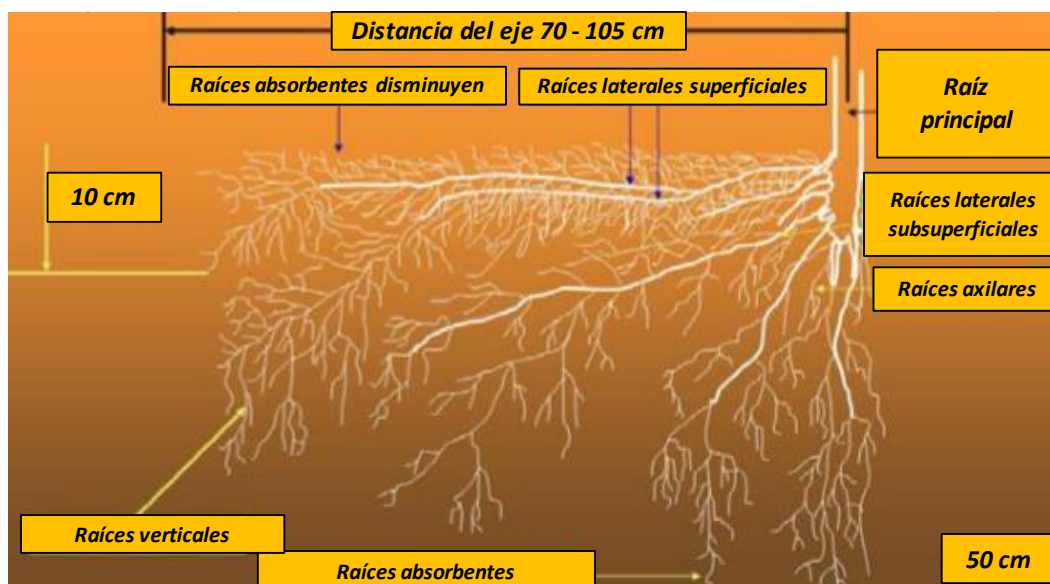


Figura 3. Raíz de una planta de café adulta. Loli, 2012.

Las dosis de agua que se aplicó a cada planta se determinaron en base al área ocupada por la planta, por tal razón, para determinar el área a ser aplicado con riego, se tomó en cuenta la distribución de las raíces de la planta en el suelo. El cultivo de café la mayor parte de sus nutrientes o agua la absorben o toma por sus raíces absorbentes o raicillas, zona que abarca los primeros 10 cm del perfil del suelo y cerca de la proyección de la copa que se extiende entre 70 a 105 cm del tronco de la planta, por lo tanto, la aplicación de agua y nutrientes debe realizarse en este lugar (Loli, 2012).

Para los cálculos de diseño, se asumió un área en forma circular al rededor del tronco de la planta tomado como radio el valor máximo de extensión de las raíces.

g. Tiempo de riego

El tiempo de riego se determinó usando la ecuación 14, este se determinó en base al requerimiento bruto por árbol y el caudal del emisor por planta.

4.4.1.3. Diseño hidráulico

El diseño hidráulico se estableció a partir del caudal y la carga de diseño, lo que permitió determinar los diámetros de tubería que se utilizó en cada uno de los componentes del sistema, cumpliendo con parámetros hidráulicos establecidos en este tipo de sistemas de riego, el cálculo hidráulico consistió en determinar las pérdidas de carga dentro del sistema en función de la disponibilidad del caudal y carga en la toma utilizada, se determinaron los siguientes parámetros:

a. Determinación de la distribución del campo

Para determinar la distribución del campo se consideró la longitud del campo, ancho del campo y pendientes del campo.

b. Selección de los criterios de diseño

Los criterios de diseño que se consideró fueron el cultivo de café que ya se encontraba establecido con espacio entre plantas e hileras de tres metros, por lo que el espacio entre emisores se adecuó al espacio entre plantas que tenía la parcela, para las

elevaciones de la manguera de distribución se consideró como altura máxima un metro y altura mínima 0,3 metros.

c. Diseño del dispositivo de carga constante

Se dispuso una fuente de agua que está ubicado al inicio del campo, es un sistema de baja presión, este tanque cumple la función del dispositivo de carga constante:

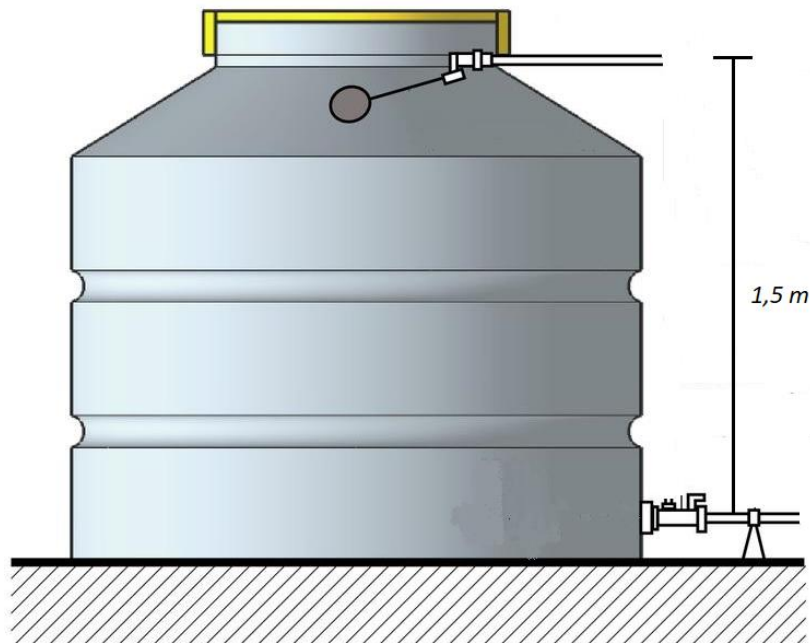


Figura 4. Dispositivo de carga constante.

Se tiene que la presión (carga) de diseño es de 1,5 m y esta altura de agua es mantenida constantemente mediante un flotador.

d. Cálculo de la longitud y el número de tuberías

Los componentes del sistema de riego por borboleamiento incluyen el dispositivo de carga de agua constante, línea de derivación, laterales, y las mangueras de distribución. El diseño de estos componentes se determinó antes de elegir los diámetros de la tubería, estas longitudes se adecuaron a las características propias de la parcela como separación entre hileras y plantas, se consideró un lateral de tubería para dos hileras de planta y también se determinó que la línea de derivación se encontraría a la mitad de la separación entre plantas.

e. Cálculo de la tasa de flujo de diseño para tuberías

Para determinar la tasa de flujo en el sistema se realizaron cálculos previos a la instalación, estos cálculos se desarrollaron en una hoja de cálculos Excel, donde se introdujeron y programaron todas las ecuaciones necesarias para el diseño del sistema, se fue introduciendo diferentes diámetros de tubería y caudales hasta que esto se adecuó y ajustó a la pérdida de carga admisible del sistema, además se llevaron a cabo experimentos de campo donde se midieron las descargas de agua en diferentes tipos de diámetro de tubería de la línea de derivación y laterales a la carga de diseño del dispositivo de carga constante, y se asumió que todos los emisores tienen el mismo caudal, es decir, el caudal del emisor es igual a la división del caudal de entrada en la línea de derivación por el número de emisores de línea lateral, posterior a la instalación del sistema se midió las descargas en cada emisor para confirmar la descarga prevista.

f. Selección de los diámetros de tubería

Para el cálculo de los diámetros de tubería se consideró el método de pérdida de carga porcentual en el que se establece un límite de pérdida de carga por fricción para cada tubería, esta pérdida de carga porcentual se determina con la ecuación 24, se asume que el 50% de la carga de diseño se puede perder en cada componente, por lo cual este es el límite de pérdida de carga permisible en cada una de las tuberías. Para determinar la pérdida de carga en cada componente se utilizó la ecuación combinada de Darcy-Weisbach y Blasius, que es recomendado para el dimensionamiento de tuberías lisas de pequeño diámetro (menores a 128 mm).

g. Cálculo de las elevaciones de las mangueras de distribución

Después de que los diámetros de la tubería lateral y mangueras de distribución fueron determinados, se procedió a calcular las elevaciones de las mangueras de distribución, esta se calculó a partir de las ecuaciones de pérdida por fricción, estas alturas nos sirvieron para ajustar las elevaciones de las mangueras de distribución, para que el agua salga de todos los emisores a tasas iguales.

h. Trazado del diagrama piezométrico

Una vez obtenidas las elevaciones de las mangueras de distribución se realizó un diagrama piezométrico trazando las elevaciones de la manguera de distribución en el perfil de cada lateral.

4.4.1.4. Implementación

El área instalada de riego por borbotamiento ocupa una superficie de 720 m² dentro de la Estación Experimental de Sapecho. La implementación del sistema se realizó en base a los resultados del diseño agronómico e hidráulico, y se iniciaron desde la implementación del dispositivo de carga constante que fue un tanque de 2.300 litros de capacidad que ofrecía una altura de carga igual a 1,5 m, luego se realizó la instalación de la línea de derivación, laterales y por últimos las mangueras de distribución, para este último se procedió a calibrar las elevaciones de las mangueras de distribución, para esto se utilizó el diagrama piezométrico anteriormente calculado, se usó las elevaciones de la carga de diseño o dispositivo de carga constante como dato de referencia para instalar el sistema para así evitar las ondulaciones que el suelo pueda presentar, después de que se hayan colocado todas las mangueras de distribución en las elevaciones calculadas, el sistema se encendió para realizar una calibración dinámica, para asegurar caudales casi iguales en cada punto de distribución de agua a las plantas.

4.4.2. Evaluación

4.4.2.1. Evaluación del sistema de riego

La evaluación del sistema de riego se realizó mediante el registro de los volúmenes de agua que sale por cada emisor evaluado. Esta medición se realizó mediante un recipiente graduado, en un tiempo determinado por un cronometro, y posteriormente con los datos obtenidos en campo se realizó el cálculo del coeficiente de uniformidad de distribución y coeficiente de uniformidad de Christiansen.

4.4.2.2. Evaluación de parámetros vegetativos del cultivo

La parcela experimental tiene un total de 80 plantas de las cuales se marcaron al azar 20 plantas por tratamiento, en cada una de ellas se seleccionaron tres bandolas al azar (parte alta, parte media y en la parte baja) por tratamiento de donde se tomaron los datos para evaluar las variables en estudio. La primera medición de datos de los parámetros vegetativos se realizó antes de la implementación del sistema de riego, posterior a la implementación del sistema de riego las mediciones se realizaron cada mes durante todo el lapso del estudio.

a. Área foliar de la planta

Para la obtención de esta variable primeramente se determinó el promedio de bandolas que tenía cada planta en estudio, posterior a eso se determinó el promedio de hojas que tenía cada bandola, luego se procedió a medir el largo de las hojas de las bandolas en estudio, esta medición se realizó desde la base hasta el ápice de las hojas en milímetros, para el cálculo del área foliar se utilizó el método adaptado por Cenicafé (1982), que indica que existe una relación funcional real entre el logaritmo de la hoja de café y el logaritmo del largo de esa hoja. Esta relación se puede considerar la misma para las diferentes variedades de café, la ecuación de regresión que la sección de biometría de Cenicafé encontró que más se ajustaba a los datos obtenidos por la sección de fisiología fue la siguiente:

$$Y = 2,02501 * X - 0,57278 \quad (29)$$

Donde:

- Y = Log. del área
- X = Log. del largo de la hoja

Una vez calculada el área de cada hoja medida, se calculó un promedio para cada planta y después se multiplicó por el número total de hojas que contenía cada bandola seleccionada, luego se multiplico por el promedio de numero de bandolas que tenía cada planta en estudio, posteriormente se realizó un promedio para cada tratamiento.

b. Longitud de la bandola

Se seleccionaron 20 plantas por tratamiento y se midió la longitud de tres bandolas tomada desde la base de la bandola del tallo hasta el ápice de la misma (en la parte alta, en la parte media y en la parte baja) con una cinta métrica en metros.

c. Número de nudos por bandola

Se contabilizó el número de nudos correspondiente a las bandolas en las que se midió el crecimiento plagiotrópico.

d. Derrame productivo o purga del cafeto

Se calculó el porcentaje de caída desde la etapa de yemas florales, flores y se realizaron cuatro conteos de frutos, de esta manera se logró observar el porcentaje del derrame productivo de los tratamientos en estudio.

4.4.3. Diseño de investigación

La evaluación del efecto del riego por borboleamiento en el cultivo de café se desarrolló en el marco conceptual de una investigación de tipo experimental de campo, a través de la aplicación de riego y determinar su efecto sobre el crecimiento vegetativo y productivo del cultivo de café. Se utilizó una comparación de medias con prueba t-student, que permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de las poblaciones son iguales, frente a la hipótesis alterna de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Se probaron dos tratamientos, que consistió en determinar el efecto del riego óptimo en el cultivo, frente a un cultivo sin uso del riego, las cuales serán: Sin riego (T0), Con riego (T1), para el tratamiento se aplicó riego teniendo en cuenta los requerimientos óptimos del cultivo.

4.4.3.1. Método estadístico

Para la evaluación del efecto del riego en el cultivo de café, se utilizó el método estadístico de comparación de medias con prueba t-student para dos muestras independientes que corresponde a la siguiente relación:

$$t = \frac{X - Y}{\sqrt{\frac{(n-1)S_1^2 + (m-1)S_2^2}{n+m-2} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right)}} \quad (30)$$

Donde:

- $t = t$ - test, dos muestras independientes
- X, Y = Media de cada uno de los grupos
- s_1^2, s_2^2 = Cuasivarianzas muestrales
- n, m = Observaciones en cada grupo

Sin embargo, para el análisis de datos se utilizó el programa Microsoft Excel que es una hoja de cálculos que nos permite realizar el análisis de datos.

4.4.3.2. Croquis de la parcela experimental

La parcela experimental tiene un total de 80 plantas de las cuales se marcaron al azar 20 plantas por tratamiento, como se muestra a continuación:

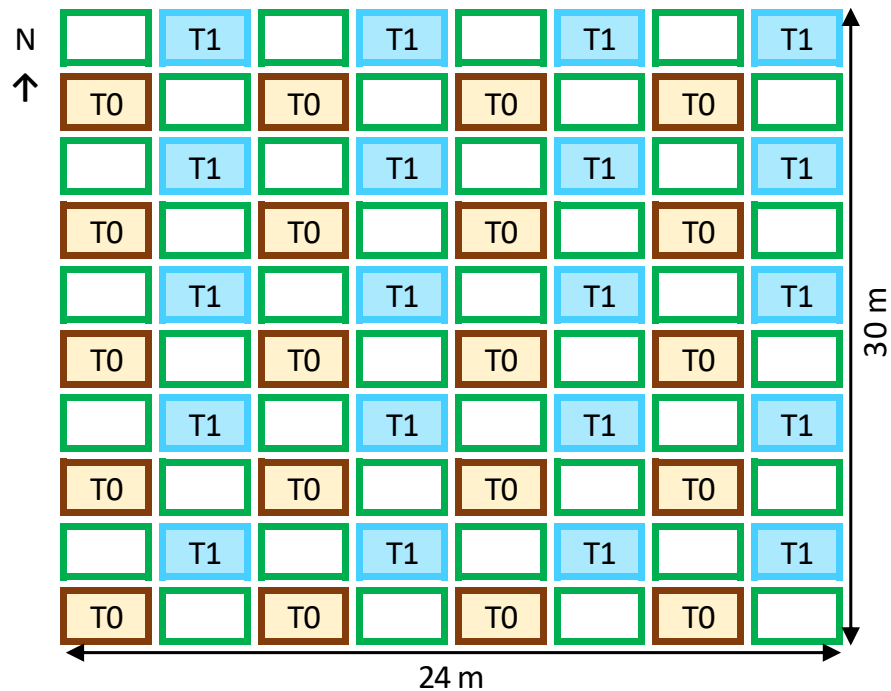


Figura 5. Croquis de campo de las unidades experimentales en estudio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis climático

Un aspecto muy importante que se debe tomar en cuenta al momento de realizar el diseño de un sistema de riego, es la información climática, esto para una mejor planificación y programación de riego al cultivo, es necesario identificar las épocas de sequía y épocas húmedas; el cual indica el momento oportuno para aplicar riego suplementario y así cumplir con los requerimientos hídricos de las plantas, o caso contrario riego complementario, aplicado en época de lluvia.

En la tabla 3, se muestran la base de datos promedio de los parámetros: precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, registrados por la estación meteorológica de la Estación Experimental de Sapecho, durante los periodos de 1996 a 2015, esto para la determinación de las demandas de evapotranspiración de referencia mensuales.

Tabla 3. Datos climáticos promedios de la Estación Experimental de Sapecho (1996 - 2015).

Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)	Precipitación (mm)	Humedad Relativa (%)	Velocidad viento (Km/h)
Enero	32,3	21,3	26,8	207,9	83,6	4,0
Febrero	31,6	21,4	26,5	190,8	85,5	3,6
Marzo	31,9	21,1	26,5	190,9	84,6	3,8
Abril	31,9	20,1	26,0	87,4	84,9	3,4
Mayo	29,3	18,4	23,9	52,3	85,4	2,8
Junio	28,4	17,7	23,1	40,0	85,5	2,9
Julio	28,9	16,6	22,7	40,2	83,0	3,1
Agosto	31,2	16,6	23,9	37,5	80,9	3,1
Septiembre	32,9	17,3	25,1	74,1	78,0	3,3
Octubre	33,3	19,8	26,6	144,3	78,3	3,8
Noviembre	33,0	20,4	26,8	113,9	80,5	3,2
Diciembre	32,7	21,1	26,9	164,8	82,4	3,4

Fuente: Estación climática de la Estación Experimental de Sapecho.

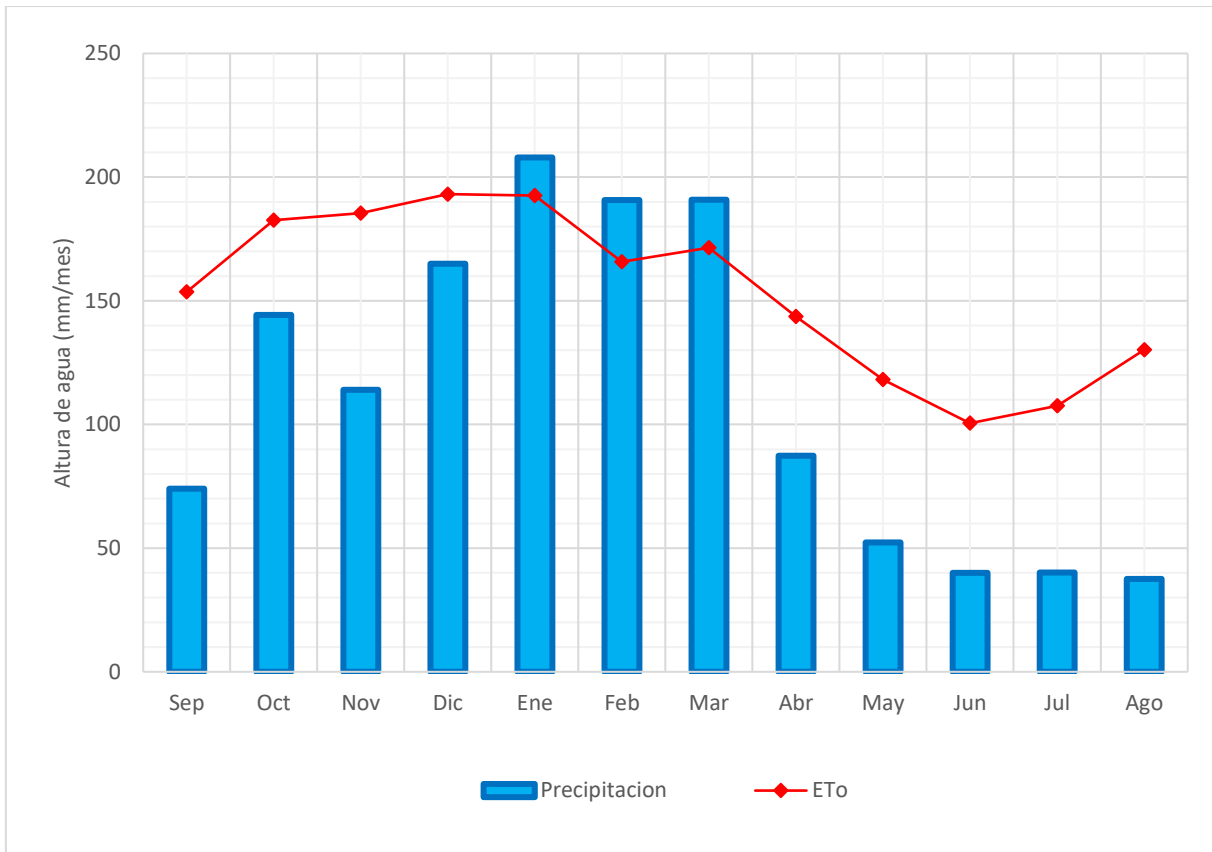


Figura 6. Diagrama bioclimático.

En base a los datos históricos de la estación climatológica de la Estación Experimental de Sapecho se ha construido el diagrama bioclimático relacionando la evapotranspiración y la precipitación. El mismo que refleja elevadas precipitaciones desde enero hasta marzo, mostrando un exceso de humedad por las precipitaciones elevadas durante el periodo vegetativo, paralelamente a esta situación, el periodo de estiaje (época seca) es desde abril a diciembre, teniéndose así una precipitación anual media de 1344,1 mm.

5.2. Superficie de la parcela en estudio

El estudio se desarrolló en un predio que cuenta con un área de 720 m², con dimensiones 24 m de ancho y 30 m de largo, el cual tiene establecido cultivo de café con separación entre plantas e hileras igual a tres metros con un total de 80 plantas de café, al realizar la planimetría del terreno se tuvo en consideración las características de la parcela debido a que ya se encontraba establecido.

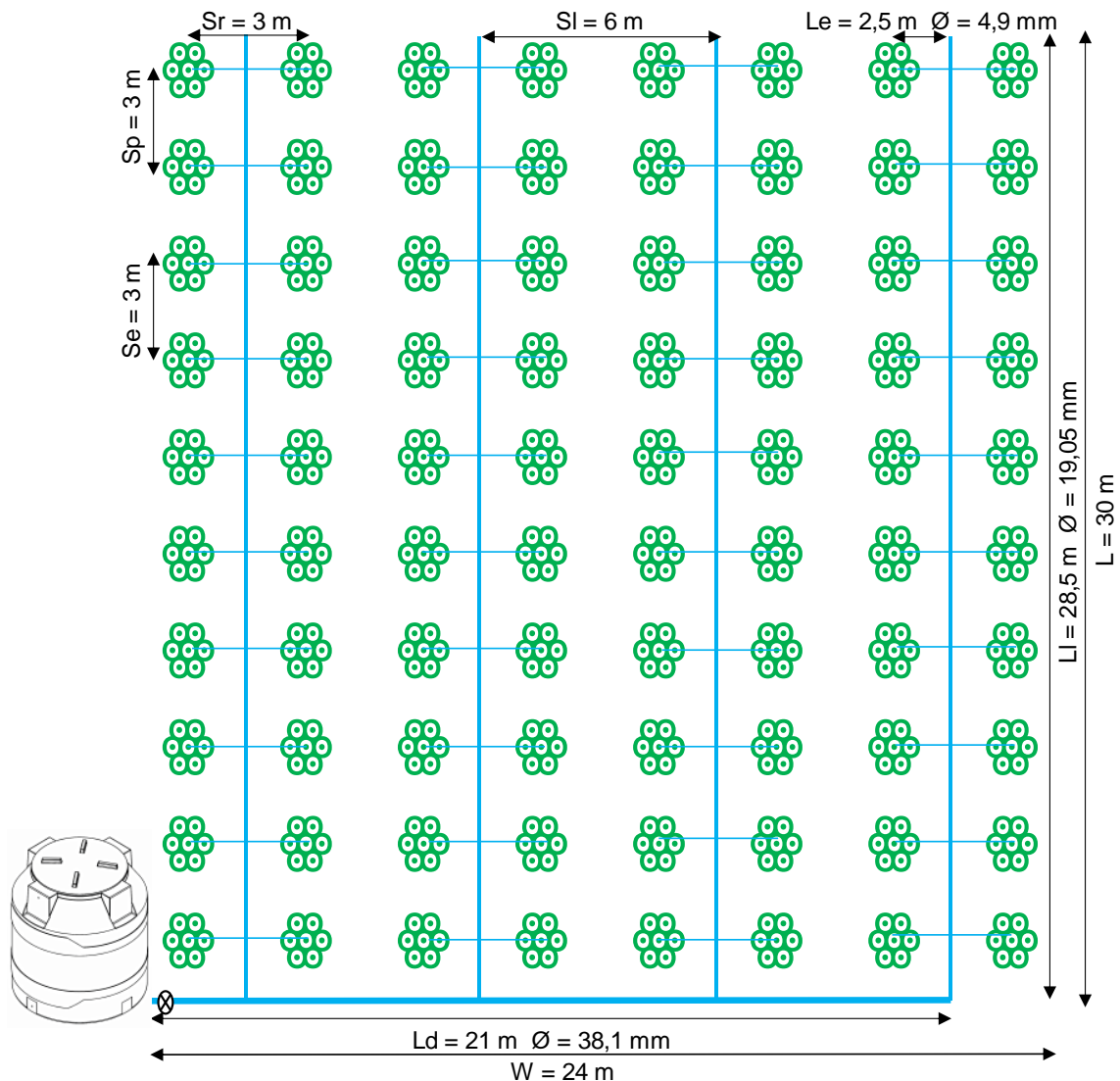


Figura 7. Planimetría de la parcela en estudio.

L = Longitud de campo; **W** = Ancho de campo; **Sp** = Espacio entre plantas; **Sr** = Espacio entre hileras; **SI** = Espacio entre laterales; **Se** = Espacio entre emisores; **Ld** = Longitud de línea de derivación; **LI** = Longitud del lateral; **Le** = Longitud de las mangueras de distribución.

5.3. Análisis del suelo

5.3.1. Propiedades físicas e hidro físicas

En la tabla 4, se observan los resultados de las muestras de suelo tomadas de la parcela en estudio y analizadas en el laboratorio de la Estación Experimental de Sapecho, donde se pudo determinar los parámetros como la textura, densidad aparente, humedad a capacidad de campo y humedad a punto de marchitez permanente.

Tabla 4. Propiedades físicas e hidro físicas del suelo.

Parámetro		Unidad	Profundidad	Resultado	Método
Textura	Arena	%	0 - 30	31,6	Bouyoucos
			30 - 60	29,6	
	Limo	%	0 - 30	43,6	
			30 - 60	46,6	
	Arcilla	%	0 - 30	24,8	
			30 - 60	23,8	
Clase textural			0 - 30	Franco	
Clase textural			30 - 60	Franco	
Densidad aparente		g/cm ³	0 - 30	1,37	Cilindro
			30 - 60	1,35	
Humedad a capacidad de campo		%	0 - 30	31,5	Soil wáter de USDA (2006)
			30 - 60	15,5	
Humedad a punto de marchitez permanente		%	0 - 30	31,5	
			30 - 60	15,5	

En la tabla 4, se observan los resultados de textura del suelo en el área de estudio, con arena 29,6 a 31,6%, limo 43,8 a 46,8% y arcilla 23,8 a 24,8% en proporciones óptimas para que el suelo se clasifique con una clase textural franco, que es un suelo de elevada productividad agrícola óptima para la mayoría de los cultivos.

Por otro lado, la tabla 4 también muestra que la densidad aparente es de 1,35 y 1,37 g/cm³ menor a 1,9 g/cm³, lo cual indica que no es un suelo compacto, favoreciendo al desarrollo de las raíces que necesitan poca energía y oxigenación (Miranda, 2004).

A partir de los resultados del análisis de textura, se determinó los parámetros de humedad a capacidad de campo (CC) y humedad a punto de marchitez permanente (PMP) con el programa Soil Wáter del USDA (2006), como se muestra a continuación:

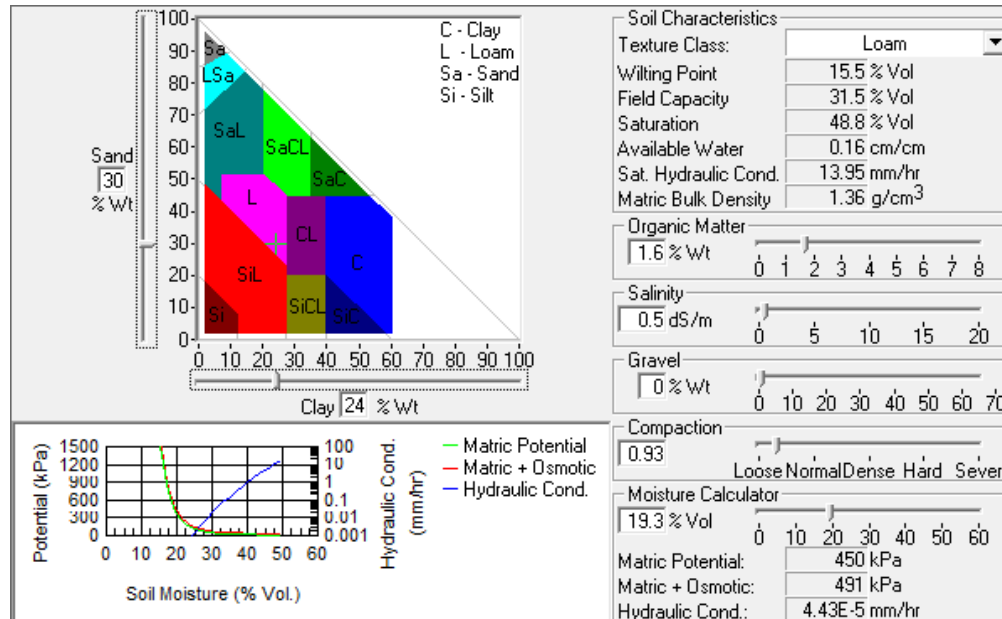


Figura 8. Parámetros del suelo de la parcela experimental. Soil Wáter de USDA (2006).

También se observan los resultados de humedad a capacidad de campo 31,5% y humedad a punto de marchitez permanente 15,5%, a partir de estos valores se puede obtener la disponibilidad de agua en el suelo, haciendo una diferencia entre el porcentaje de humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), teniendo como resultado 16% de disponibilidad de agua en el suelo dentro de ese rango, pero no toda esa cantidad de agua es aprovechado por la planta, lo aprovechado es lo que está a su alcance y es tomado por las raíces sin ningún esfuerzo denominado agua fácilmente disponible.

5.3.2. Infiltración del suelo

Los resultados de la práctica de infiltración se ven reflejados en la figura 9, a medida que incrementa el tiempo de infiltración del agua en el suelo, la tasa de infiltración va disminuyendo hasta llegar a ser constante. Esto se determinó cuando el intervalo de tiempo que tardó en infiltrar a una lámina constante, a partir de este instante se obtuvo

una velocidad de infiltración básica igual a 6,92 mm/h (0,692 cm/h), según USDA (1999), indica que la infiltración en el suelo es moderadamente lenta, esto significa que por cada metro cuadrado de suelo la cantidad de agua infiltrada será de 6,92 litros en una hora. La velocidad de infiltración del agua en el suelo es moderadamente lenta lo que implica una alta capacidad de retención de agua.

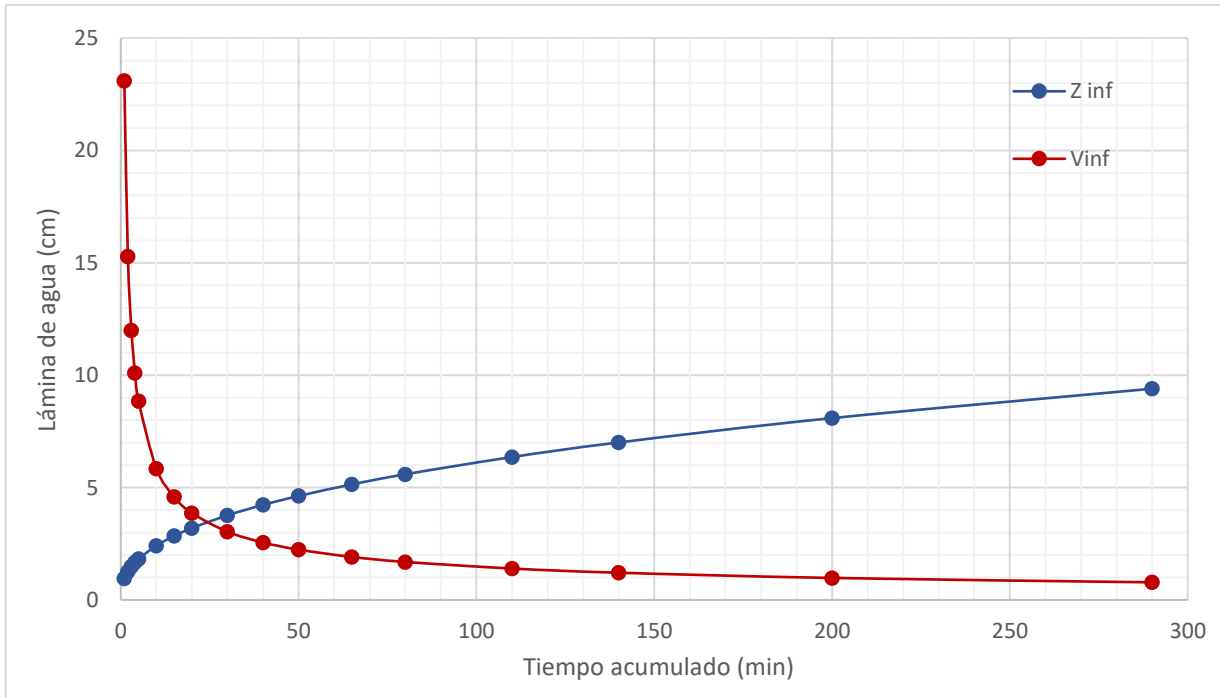


Figura 9. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada del suelo.

La parcela en estudio presenta característica de suelo con clase textural franco, con una velocidad de infiltración baja, por lo tanto, la retención de humedad del suelo es alta, lo que nos indica que este suelo es apto para el riego por borboleamiento, ya que este tipo de riego no está recomendado para suelos con velocidades de infiltración alta, esto por las grandes tarifas de descarga que tienen.

Según Berlín (1982), la velocidad de infiltración depende principalmente de la porosidad y permeabilidad del suelo. A su vez depende de la estructura del suelo y, por lo tanto, de su textura, su contenido de materia orgánica y de la labranza.

CENTA (2002), explica que el agua que se infiltra en el suelo, puede tomar tres caminos: una parte queda almacenada en la zona de raíces y es el agua aprovechada

por la planta, para realizar sus funciones fisiológicas y su desarrollo; otra se evapora desde la superficie del suelo y otra parte se desplaza hasta una profundidad mayor que la profundidad de raíces; a esta última se le conoce como filtración profunda o percolación, esta agua tampoco es utilizada por las plantas para su desarrollo. Esta última condición es más frecuente en suelos con altas tasas de velocidad de infiltración y baja capacidad de retención de humedad.

5.4. Diseño agronómico

5.4.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia

Tabla 5. Evapotranspiración de referencia (ETo).

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	21.2	32.5	83	96	12.7	30.5	6.21
Febrero	21.4	31.7	85	86	12.5	29.9	5.97
Marzo	21.1	32.0	85	91	12.2	28.0	5.56
Abril	20.0	31.9	85	82	11.8	24.8	4.84
Mayo	18.2	29.2	85	67	11.5	21.8	3.84
Junio	17.1	28.4	86	70	11.3	20.1	3.34
Julio	16.5	29.1	83	74	11.4	20.8	3.51
Agosto	16.5	31.3	81	74	11.7	23.5	4.25
Septiembre	17.3	33.0	78	79	12.0	26.6	5.15
Octubre	19.6	33.4	78	91	12.4	29.1	5.90
Noviembre	20.3	33.0	81	77	12.7	30.3	6.14
Diciembre	21.0	32.8	82	82	12.8	30.6	6.24
Promedio	19.2	31.5	83	81	12.1	26.3	5.08

El cálculo se realizó utilizando el programa CROPWAT 8,0, a partir de los datos históricos obtenidos de la estación climatológica de la Estación Experimental de Sapecho, los resultados se presentan en la tabla 5, Para el diseño del sistema se tomó la evapotranspiración de referencia del mes con el valor más alto del año con un valor igual a 6,24 mm/día.

5.4.2. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo se realizó en base a la ecuación 6:

$$ETc = 6,24 \text{ mm/día} * 1,10$$

$$ETc = 6,86 \text{ mm/día}$$

Para el dato del coeficiente del cultivo fue considerada en base al manual N° 56 de riego y drenaje, FAO (1998), para este estudio se eligió para un suelo con cobertura vegetal, los valores van de 1,05 a 1,10 en todo el desarrollo de la planta, para el diseño del sistema de riego se consideró el valor máximo.

5.4.3. Cálculo de la evapotranspiración reducida

El cálculo de la evapotranspiración reducida se realizó en base a la ecuación 7:

$$ETcred = 6,86 \text{ mm/día} * 0,60$$

$$ETcred = 4,12 \text{ mm/día}$$

Para determinar del coeficiente de reducción se utilizó en base a la ecuación 8:

$$Kr = \frac{55}{100} * 1,10$$

$$Kr = 0,60$$

5.4.4. Cálculo de la frecuencia de riego

El cálculo de la frecuencia de riego se realizó en base a las ecuaciones 9 y 10:

$$La = \left(\frac{31,5\% - 15,5\%}{100\%} \right) * \frac{1,36 \text{ g/cm}^3}{1 \text{ g/cm}^3} * 60 \text{ cm} * 0,5$$

$$La = 6,52 \text{ cm} \rightarrow La = 65,28 \text{ mm}$$

$$FR = \frac{65,28 \text{ mm}}{6,86 \text{ mm/día}}$$

$$FR = 9,51 \text{ días} \rightarrow FR = 9 \text{ días}$$

La frecuencia de riego se estimó teniendo en cuenta la relación agua, suelo, planta y clima, considerando elementos como la evapotranspiración, la humedad aprovechable del suelo y el criterio de riego.

La humedad aprovechable del suelo se obtuvo en base a las características físico-hídricas del suelo, como ser capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y la profundidad efectiva de las raíces del cultivo. Para el criterio de riego se consideró que se debe aplicar riego cuando se consume el 50% de la humedad aprovechable.

Sin embargo, como el riego localizado se caracteriza por operar a baja frecuencia, es decir una frecuencia menor a tres días, por lo que se estableció una frecuencia de riego de tres días.

5.4.5. Cálculo de la lámina neta

El cálculo de la lámina neta se realizó en base a la ecuación 11:

$$Z_n = 3 \text{ días} * 4,12 \text{ mm/día}$$

$$Z_n = 12,36 \text{ mm}$$

5.4.6. Cálculo de la lámina bruta

Para la eficiencia de riego se consideró un valor de 85% por ser riego localizado, el cálculo de la lámina bruta se realizó en base a la ecuación 12:

$$Z_b = \frac{12,36}{0,85}$$

$$Z_b = 14,54 \text{ mm}$$

5.4.7. Cálculo del volumen bruto por árbol

El volumen de agua que se aplicara a cada planta se calculó en base a la ecuación 13:

$$V_{ba} = 14,54 \text{ mm} * (3,14 \text{ m}^2)$$

$$V_{ba} = 45,66 \text{ l/planta}$$

Para determinar el área que se va aplicar agua, se tomó en cuenta la extensión de las raíces al rededor del tronco de la planta, este se extiende de 70 a 105 cm, para el diseño se tomó el valor de un metro.

5.4.8. Cálculo del tiempo de riego

El cálculo del tiempo de riego que se debe aplicar al cultivo se realizó mediante la ecuación 14:

$$Tr = \frac{45,66 \text{ l}}{0,009 \text{ l/s} * 60}$$

$$Tr = 85 \text{ min} \rightarrow 1 \text{ hora con 25 minutos}$$

Se tomó un caudal por emisor igual a 0,009 l/s, este caudal fue determinado al inicio del diseño del sistema de riego. Para irrigar el área de estudio se ha propuesto un solo turno de riego de una hora con 25 minutos con un intervalo de riego de tres días.

5.5. Diseño hidráulico

5.5.1. Determinación de parámetros y criterios de diseño

Los resultados del cálculo de los parámetros y criterios para el diseño hidráulico se muestran en la tabla 6:

Tabla 6. Parámetros y criterios de diseño.

Descripción		Unidad	Valores
Dispositivo de carga constante			
Carga de diseño	Hd	m	1,5
Criterios de diseño			
Espacio entre planta	Sp	m	3
Espacio entre hileras de árboles	Sr	m	3
Espaciamiento entre laterales	Sl	m	6
Espacio entre emisores	Se	m	3
Elevación máxima de la manguera de distribución	Hmax	m	1
Elevación mínima de la manguera de distribución	Hmin	m	0,30
Longitud y el número de tuberías			
Longitud de la línea de derivación	Ld	m	21
Longitud de los laterales	LI	m	28,5
Longitud de las mangueras de distribución	Le	m	2,5
Número de emisores por lateral	Ne	unid	20
Número de laterales	NI	unid	4
Número total de árboles	Nt	unid	80
Tasas de flujo de diseño para las tuberías			
Caudal del emisor	Qe	l/s	0,009
Caudal del lateral	Ql	l/s	0,18
Caudal de la línea de derivación	Qd	l/s	0,72

5.5.2. Cálculo de los diámetros de tubería

5.5.2.1. Diámetro de la línea de derivación

La pérdida total de carga permitida dentro del sistema, se debe disipar mediante la fricción, dentro los accesorios, línea de derivación, laterales y mangueras de distribución, esta se obtuvo mediante la ecuación 24:

$$(h_f)_a = 1,50 \text{ m} - 0,30$$

$$(h_f)_a = 1,20 \text{ m}$$

Se asume que el 50% de la pérdida de carga permitida se puede perder dentro de la línea de derivación:

$$(hf)ad = 0,50 * 1,20$$

$$(hf)ad = 0,60 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga en la línea de derivación

Tabla 7. Perdidas de carga en la línea de derivación.

Lateral	Longitud parcial (m)	Longitud acumulada (m)	Diámetro tubería (mm)	Caudal (l/s)	Perdida de carga parcial (m)	Perdida de carga acumulada (m)
1	4,5	4,5	38,1	0,72	0,062	0,062
2	6	10,5	38,1	0,54	0,050	0,112
3	6	16,5	38,1	0,36	0,025	0,136
4	4,5	21	38,1	0,18	0,005	0,142

Mediante la ecuación 1, para un diámetro de 38,1 mm (1,5"), para un caudal de 0,72 l/s y una longitud de 21 m, para 4 salidas se obtuvo una pérdida de carga $H_f = 0,14 \text{ m}$ en la línea de derivación.

5.5.2.2. Diámetro del lateral y mangueras de distribución

Dentro de la línea de derivación, se calcularon las pérdidas de carga por fricción a la entrada de los laterales, a través de la ecuación 1, y mediante el método tramo a tramo,

es decir, calculando la pérdida de carga entre la salida y los laterales, los resultados se observan en la tabla 8:

Tabla 8. Pérdidas de carga en la entrada de los laterales.

Lateral	Longitud (m)	Caudal (l/s)	hf (m)
1	4,5	0,72	0,062
2	6	0,54	0,050
3	6	0,36	0,025
4	4,5	0,18	0,005
Total			0,142

Por lo tanto, los anteriores deben ser sustraídos de la presión de diseño, para conocer la presión de entrada en cada lateral:

Tabla 9. Presión de entrada en cada lateral.

Lateral	hd - hf (m)
1	1,44
2	1,39
3	1,36
4	1,36

Se determinó los diámetros de los laterales y emisores, así como la altura para el cuarto lateral, la pérdida de carga permitida dentro el lateral y en las mangueras de distribución se obtuvo mediante la ecuación 24, y es la diferencia entre la presión de entrada en el lateral y la altura mínima de los emisores:

$$(h_f)_a = 1,36 \text{ m} - 0,30 \text{ m}$$

$$(h_f)_a = 1,06 \text{ m}$$

El diámetro de los laterales y emisores es uno de los aspectos más críticos en el diseño de los sistemas por borbulleamiento. Para determinar estos factores, se calculó la pérdida de carga permitida en el lateral y emisores, asumiendo un 50% de hfa:

$$(hf)_{ad} = 0,50 * 1,06 \text{ m}$$

$$(hf)_{ad} = 0,53 \text{ m}$$

Cálculo de pérdidas de carga en los laterales

Tabla 10. Pérdidas de carga en los laterales.

Emisor	Longitud parcial (m)	Longitud acumulada (m)	Diámetro tubería (mm)	Caudal (l/s)	Pérdida de carga parcial (m)	Pérdida de carga acumulada (m)
1	1,5	1,5	19,05	0,18	0,049	0,049
2	3	4,5	19,05	0,162	0,082	0,131
3	3	7,5	19,05	0,144	0,066	0,197
4	3	10,5	19,05	0,126	0,053	0,249
5	3	13,5	19,05	0,108	0,040	0,290
6	3	16,5	19,05	0,09	0,029	0,319
7	3	19,5	19,05	0,072	0,020	0,338
8	3	22,5	19,05	0,054	0,012	0,350
9	3	25,5	19,05	0,036	0,006	0,356
10	3	28,5	19,05	0,018	0,002	0,358

Mediante la ecuación 1, para un diámetro de 19,05 mm (3/4"), para un caudal 0,18 l/s y una longitud de 28,5 m, para 10 salidas se obtuvo una pérdida de carga $H_f = 0,36$ m, este valor se encuentra dentro de la pérdida de carga permitida en el lateral que era igual a 0,53 m.

Cálculo de pérdida de carga en las mangueras de distribución

$$(hf)dh = 7,89 \times 10^5 * \frac{(0,009 \text{ l/s})^{1,75}}{(4,9 \text{ mm})^{4,75}} * 2,5 \text{ m}$$

$$(hf)dh = 0,27 \text{ m}$$

Mediante la ecuación 1, para un diámetro de 4,9 mm se obtuvo una pérdida de carga $H_f = 0,27$ m, lo que totaliza una pérdida de carga total en el lateral igual a $h_{ft} = 0,63$ m.

El diámetro de cada tubería se determinó sustituyendo el caudal asumido, la longitud conocida de la tubería y pérdida de carga admisible para cada componente del sistema en la ecuación de pérdida por fricción, fue 38,1 mm para la línea de derivación, 19,05 mm para los laterales y 4,9 mm para las mangueras de distribución.

Cálculo del número de Reynolds en el sistema

El número de Reynolds se determinó en base a la ecuación 2:

$$(Re)_d = 126943 * \frac{0,00072 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0381 \text{ m}} = 2.398,9$$

$$(Re)_l = 126943 * \frac{0,00018 \text{ m}^3/\text{s}}{0,01905 \text{ m}} = 1.199,5$$

$$(Re)_e = 126943 * \frac{0,000009 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0049 \text{ m}} = 233,1$$

Se puede evidenciar que aguas arriba el flujo es turbulento alcanzando flujo laminar aguas abajo, por tanto, se cumple lo descrito por Watters y Keller (1978), que señalan que el flujo en el sistema de riego es típicamente turbulento en aguas arriba y laminar en la corriente de aguas abajo, el flujo en sistema disminuye.

Cálculo de esclusas de aire en el sistema

Para determinar si el sistema podía formar bolsas de aire en los emisores se determinó en base a la ecuación 4:

$$0,009 \text{ l/s} = 0,000101 * (4,9 \text{ mm})^{2,41}$$

$$0,009 \text{ l/s} > 0,0047 \text{ l/s}$$

Se puede evidenciar que el caudal de diseño es superior al calculado, por lo tanto, se puede decir que el sistema no tendrá problemas por esclusas de aire.

5.5.3. Cálculo de la altura de los emisores

Una vez determinados los diámetros de los laterales y emisores se calculó la altura de los emisores, tal como se muestra en la tabla 11, las columnas 5 y 7 son calculadas a partir de la ecuación 1, las perdidas menores se calcularon en base a la ecuación 24.

Tabla 11. Altura de los emisores para un lateral.

Número de salidas	Caudal (l/s)	Longitud (m)	Longitud acumulada (m)	(hf)l (m)	Presión disp. en lateral(m)	(hf)e (m)	Pérdida accesorios (m)	Pérdida total (m)	Presión disp. en emisor (m)	Altura emisor (m)	Punto referencia (m)
0					1,36						0
1	0,180	1,5	1,5	0,049	1,31	0,27	0,012	0,32	1,04	1,04	-0,46
2	0,162	3	4,5	0,082	1,23	0,27	0,012	0,40	0,96	0,96	-0,54
3	0,144	3	7,5	0,066	1,16	0,27	0,012	0,47	0,89	0,89	-0,61
4	0,126	3	10,5	0,053	1,11	0,27	0,012	0,52	0,84	0,84	-0,66
5	0,108	3	13,5	0,040	1,07	0,27	0,012	0,56	0,80	0,80	-0,70
6	0,090	3	16,5	0,029	1,04	0,27	0,012	0,59	0,77	0,77	-0,73
7	0,072	3	19,5	0,020	1,02	0,27	0,012	0,61	0,75	0,75	-0,75
8	0,054	3	22,5	0,012	1,01	0,27	0,012	0,62	0,74	0,74	-0,76
9	0,036	3	25,5	0,006	1,00	0,27	0,012	0,63	0,73	0,73	-0,77
10	0,018	3	28,5	0,002	1,00	0,27	0,012	0,63	0,73	0,73	-0,77
0,358											

5.5.4. Trazado del diagrama piezométrico

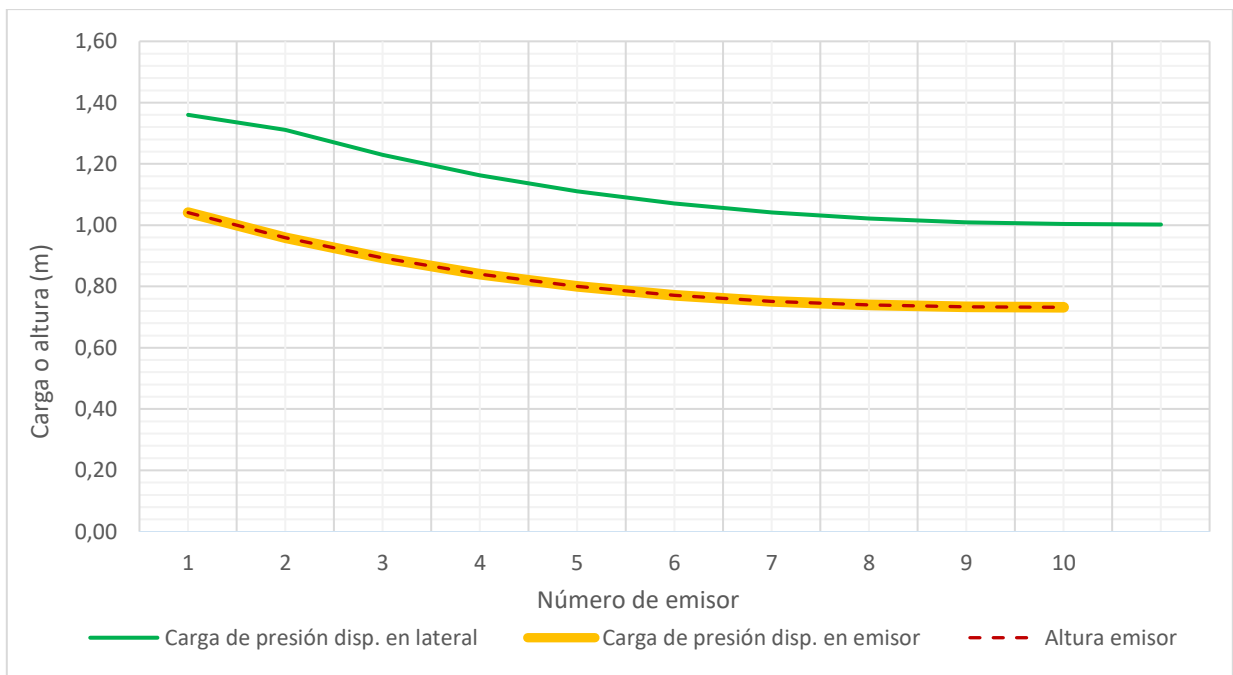


Figura 10. Diagrama piezométrico para un lateral.

La figura 10, muestra el diagrama piezométrico que sirve de mucha ayuda para la instalación del sistema. La carga de diseño se tomó como punto de referencia para la instalación del sistema esto para evitar ondulaciones superficiales que pudiera afectar la altura de los emisores. En la columna punto de referencia de la tabla 11, muestra la diferencia de alturas entre el emisor y la carga de diseño que es el punto de referencia. Después que los emisores fueron instalados se procedió a poner en funcionamiento el sistema, esto para hacer una calibración dinámica a las alturas de los emisores para asegurar un caudal uniforme en todos los puntos.

5.6. Evaluación

5.6.1. Evaluación del coeficiente de uniformidad del sistema de riego

Las evaluaciones se realizaron mediante el registro del volumen de agua, que sale por cada emisor del sistema, posteriormente se utilizó la ecuación 26 y 27, para determinar el coeficiente de uniformidad de Christiansen y coeficiente de uniformidad de distribución:

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum |0,1711|}{1,0419} \right] * 100 \quad CUC = 83\%$$

$$CUD = \frac{0,0066 \text{ l/s}}{0,0087 \text{ l/s}} * 100 \quad CUD = 76\%$$

La interpretación del funcionamiento de los emisores basados en la uniformidad de distribución, es posible realizarla en base a las categorías de funcionamiento de riego.

Tabla 12. Clasificación de los coeficientes de uniformidad.

Funcionamiento	Coficiente de uniformidad
Excelente	90 - 100
Buena	80 - 90
Aceptable	70 - 80
Mala	60 70
Inaceptable	< 70

Fuente: Merriam y Keller (1978).

De acuerdo a los resultados obtenidos de coeficiente de uniformidad CUC = 83% y coeficiente de uniformidad de distribución CUD = 76%, este resultado nos indica que el sistema de riego tiene entre buena y aceptable uniformidad de distribución.

5.6.2. Evaluación del efecto de aplicación de riego en el cultivo

La evaluación del riego en el cultivo de café para determinar su efecto sobre el crecimiento vegetativo y productivo del cultivo de café, se desarrolló aplicando riego complementario según el requerimiento óptimo del cultivo. En todo el desarrollo del estudio se aplicó 1.369,8 l/planta, los resultados de las variables estudiadas se muestran a continuación:

5.6.2.1. Área foliar de la planta

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que, en la medición realizada, el área foliar de la planta de café se vio favorecida por la aplicación de riego.

Tabla 13. Prueba de medias en la variable área foliar de la planta.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	2,01	0,45	a
T1	2,86	0,36	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable área foliar de la planta, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que el área foliar del testigo sin aplicación de riego alcanzo un incremento promedio de $2,01 \pm 0,45$ m², y con el tratamiento aplicación de riego alcanzo un incremento promedio de $2,86 \pm 0,36$ m².

El comportamiento de la primera medición y la última medición en el área foliar del café, muestra que la aplicación de riego con una lámina óptima requerida por el cultivo supera en un 30% más de área foliar que en el tratamiento que no se aplicó riego.

Valencia (1973), concluye que la hoja es el principal órgano donde se realiza la fotosíntesis, por lo que el conocimiento de este carácter es un índice adecuado para

estimar la capacidad de la planta para transformar la energía luminosa en energía química; también que el área foliar del café al igual que en todas las plantas constituye una de las características más importantes, ya que la misma ha resultado ser un adecuado indicador de productividad o rendimiento.

En estudios se ha comprobado que el área foliar es una variable relacionada directa o indirectamente con los procesos de crecimiento vegetativo, tasa de desarrollo, eficiencia sintética, evapotranspiración, uso de nutrientes y agua. En el proceso de producción de la planta, la superficie foliar disponible está relacionada con la asimilación de carbono durante su ciclo de vida (Arcilla y Chávez, 1995).

De acuerdo con Watson (1952), es posible expresar por unidad de superficie tanto el rendimiento agrícola como el área foliar hecho que hace que esta variable sea un indicador de la productividad.

5.6.2.2. Número de nudos y longitud de bandolas

Los nudos productivos varían cada año hacia el extremo de las bandolas (crecimiento plagiotrópico) y en sentido vertical del tallo (crecimiento ortotrópico), acumulando números de nudos improductivos y defoliados de la cosecha anterior (Ramírez, 1996).

Los nudos producen frutos solo una vez (Palma 2001), en cada ciclo de producción los nudos productivos se localizan hacia los extremos de las ramas, cada año de producción queda mayor área de tejido improductivo en la planta (Ramírez 1996).

Tabla 14. Prueba de medias en la variable número de nudos.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	2,81	0,16	a
T1	3,29	0,16	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable número de nudos, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que el número de nudos del testigo sin aplicación de riego alcanzo un promedio de $2,81 \pm 0,16$, y con el

tratamiento aplicación de riego alcanzo un promedio de $3,29 \pm 0,16$, lo que equivale a un 30,10% de diferencia en el número de nudos con la aplicación de riego respecto al testigo.

Tabla 15. Prueba de medias en la variable longitud de bandolas.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	24,85	2,61	a
T1	40,32	2,03	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable longitud de bandolas, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que las bandolas del testigo sin aplicación de riego alcanzo un incremento promedio de $24,85 \pm 2,61$ cm de longitud, y con el tratamiento aplicación de riego alcanzo un incremento promedio de $40,32 \pm 2,03$ cm de longitud, lo que equivale a un 38,37% de diferencia en el crecimiento de las bandolas con la aplicación de riego respecto al testigo.

El número promedio de nudos en el testigo es inferior estadísticamente con respecto al tratamiento con irrigación, el promedio más alto obtenido en el estudio corresponde a la aplicación de riego óptimo requerido por el cultivo.

Este indicador es de suma importancia, pues al formarse nuevos nudos, significan que para el siguiente ciclo de producción se garantizará la floración y fructificación en las bandolas que durante este este ciclo se obtendrán; en este caso se ha demostrado que el aporte del riego influye, pues supera hasta en un 30,1% en comparación al testigo.

La formación de nuevos nudos permitirá un incremento en la producción (Mestre y Ospina, 1994). Según Balladares y Calero (2005), los nudos son importantes porque de este se originan las ramas primarias que son el tejido nuevo y productivo en los primeros años de vida de un cafeto, al aumentar los nudos aumentan el número de ramas en la planta y por ende la productividad del cafeto a largo plazo ya que estos aumentan conforme la longevidad de la planta.

El crecimiento de las bandolas está directamente relacionado con el indicador anterior, pues lógicamente al darse mayor crecimiento plagiotrópico de las bandolas, mayor sería el número de nudos potencialmente productivos formados, para ambos casos existe la misma tendencia mostrándose valores que demuestran esta relación, en la variable longitud de bandolas se observa un mayor desarrollo con la aplicación de riego con un promedio de 40,32 cm, el testigo fue el que obtuvo el promedio más bajo igual a 24,85 cm, esto nos dice que el tratamiento tuvo un 38,65% de incremento respecto al testigo. Estos resultados son similares a los que obtuvieron Cisneros y Martínez (2001), en este caso el crecimiento fue proporcional a la cantidad de agua aplicada y el valor más bajo perteneció al testigo ubicándose en la categoría más baja.

Esta comparación permite afirmar que el riego localizado influye en el aumento del crecimiento vegetativo, en dependencia de la cantidad de agua que se aplique. Según Borges (2000), el riego en el cafeto proporciona un mejor crecimiento de los cultivos, lo que garantiza vigor de la planta.

Por otra parte, Rubens (1988), indica que cuando el café se somete a un mayor contenido de humedad de suelo mayor será el desarrollo vegetativo.

5.6.2.3. Derrame productivo o purga del cafeto

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que, en la medición realizada, la variable derrame productivo tuvo un efecto favorable con la aplicación de riego óptimo.

Tabla 16. Prueba de medias en la variable derrame productivo.

Tratamientos	Media	Desviación estándar	Estadístico t
T0	3,04	0,12	a
T1	1,98	0,18	b

En el análisis estadístico realizado para la aplicación de riego en el cultivo de café en la variable derrame productivo, se tiene la siguiente interpretación: Al nivel alfa del 5%, hay diferencia estadística entre el tratamiento y el testigo, es decir que el promedio de frutos del testigo sin aplicación de riego alcanzo un promedio de $3,04 \pm 0,12$, y con el tratamiento aplicación de riego alcanzo un promedio de $1,98 \pm 0,18$.

A los cinco meses de aplicación de riego se evaluó el derrame o purga de los frutos, pero en este caso el tratamiento con riego lo hace con menor intensidad. El tratamiento con la lámina de riego óptimo pierde un 13%, y el testigo pierde más del 30% de sus frutos.

Arcila (2008), considera que el impacto de la radiación solar y el déficit hídrico pueden ocasionar secamiento de los botones florales, abscisión o caída de flores, pérdida o reducción de la capacidad de floración. La caída de frutos ha sido asociada a la falta de agua al comienzo de la etapa de crecimiento acelerado del fruto (CATIE, 2002).

Una planta de café florece en diferentes épocas, en una misma rama se pueden encontrar frutos con distintos estados de desarrollo, principalmente en climas tropicales que no están bien marcada las estaciones del año (Puerta, 2000). En una planta se pueden encontrar, frutos maduros, verdes, medianos, pequeños y flores, ocurriendo todas estas etapas en el mismo nudo productivo (Crisosto *et al.*, 1992).

Campbell (1987), afirma que la deficiencia de agua en la maduración y la formación de los botones no puede afectar a la productividad en el año, pero dificulta seriamente la producción del año siguiente, conclusión que nos hace pensar que el comportamiento de la producción del testigo en nuestro estudio podría tener esta tendencia.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo al estudio realizado con la implementación y evaluación de riego por borboleamiento en el cultivo de café (*Coffea canephora*) se derivan las siguientes conclusiones:

- La parcela en estudio presenta característica de suelo con clase textural franco, con una capacidad de campo de 31,5% y una infiltración básica de 6,92 mm/h siendo un suelo con una velocidad de infiltración moderadamente lenta lo que implica una alta capacidad de retención de agua.
- Se realizó el diseño agronómico e hidráulico para la implementación del sistema de riego en el cultivo de café, a partir del cual se determinaron los parámetros hidráulicos que permitió el cálculo de los componentes del sistema de riego y poder satisfacer las necesidades hídricas del cultivo.
- La implementación del sistema de riego de baja presión como el borboleamiento, demostró ser adecuado para irrigar cultivos con grandes demandas de agua, de fácil manejo, operación y mantenimiento, además este puede ser implementado y operado sin grandes inversiones económicas, siendo una alternativa tecnológica para pequeños y medianos productores.
- La evaluación realizada al sistema implementado en la parcela en estudio arrojó un coeficiente de uniformidad de Christiansen igual a 83% y coeficiente de uniformidad de distribución igual a 76%, estos resultados nos indican que el sistema de riego se encuentra entre bueno y aceptable.
- El uso de riego complementario en el cultivo de café tiene un efecto positivo en el crecimiento vegetativo del cultivo, superando hasta en más del 30% respecto al testigo, además se redujo en un 17% en las pérdidas de frutos.

7. RECOMENDACIONES

En base al estudio realizado se da las siguientes recomendaciones:

- Realizar mantenimientos sistemáticos al sistema, de forma tal que se logre su funcionamiento en correspondencia con los parámetros agronómicos e hidráulicos calculados.
- Ejecutar las actividades agronómicas recomendadas para el cultivo, fundamentalmente limpiezas y podas para garantizar el potencial productivo en correspondencia con el cubrimiento de las necesidades hídricas mediante el sistema de riego implementado.
- Realizar evaluaciones periódicas al sistema de riego para ejecutar la explotación del mismo en correspondencia con los resultados obtenidos en las evaluaciones.
- Realizar periódicamente una purga del aire que se pueda formar en las líneas, esta acción se puede realizar abriendo los tapones de cada lateral hasta que todo el aire haya sido eliminado de las líneas.
- Continuar con trabajos en la parte hidráulica del sistema de riego por borbotamiento y otros sistemas, ya que juegan un papel importante en la distribución de agua a los cultivos y se ven reflejados en el rendimiento de los mismos.
- Se sugiere replicar el presente estudio en otros cultivos y zonas con pendientes, porque no hay suficientes investigaciones e información sobre el comportamiento hidráulico con respecto a este sistema de riego.
- Realizar investigaciones en láminas y frecuencias de riego en el cultivo de café y otros cultivos de la zona de estudio.
- Guardar las mangueras de riego después de cada cosecha para que no se deterioren por el uso de herramientas agrícolas y además limpiar el sistema destapando los tapones de cada lateral ya que este puede acumular impurezas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Abdel, N. (2016). Diseño de sistema de riego por burbujeo de baja carga. En: goyal, m. R; chavan, vk; tripathi, vk (eds.). Innovaciones en tecnología de micro riego. Nueva York: apple academic press., 2016. Cap. 5, pág. 101-172.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del Cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 299 p.

Arcilla, P. J. y Chávez, B. (1995). Derrame foliar del cafeto en tres densidades de siembra. *Cenicafé* 46(1): 5-20.

Arcila, P. J. (2008). Crecimiento y desarrollo de la planta de Café. Bogotá, Col. 40p.

Balladares, D. y Calero, J. (2005). Efecto de la Sombra y Fertilización sobre el Crecimiento, Estructura Productiva, Rendimiento y Calidad del Café. Managua, Nicaragua UNA. 69 p.

Bamohuni, S. (2011). Design proposal of drip irrigation system for an efficient management of irrigation water for maize improved seeds production in a part of seeds farm of Ioumbila. *Universita degli Studi di Firenze Facolta di Agraria*. 33-40 p.

Berlín, A. (1982). Riego y drenaje. Manual para educación agropecuaria. Editorial trillas. México. p. 13-41.

Bernardo, S., Soares, A. A. y Mantovani, E. C. (2009). Manual de riego. 8ª ed. Ed. UFV, Viçosa.

Bi, A. (2010). Sistema de riego. Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/>.

Borges, J. T. S. (2000). Propiedades de cozimento e caracterização físico-química de macarrão. *Boletim do Centro de Pesquisas e Processamento de Alimentos*, v. 21, n.2, p. 303-322.

Camargo, A. P., Camargo, M. B. y Pereira, A. R. (2008). Agrometeorología del Café en Brazil. Brazil: Soform Formularios.

Campbell, A. (1987). Balance hídrico, floración y necesidad de agua para el Café. En: Simposio sobre la gestión del agua en la agricultura, 1987, de Campinas. Fundación Cargill.

Cárdenas, E., Castillo, N., Lloclla, V., Figueredo, F., Zúñiga, F., Espinoza, M. y Contreras, E. (2012). Producción de Cafés especiales. Manual técnico. Programa selva central. Lima, Perú. 46 pp.

CATIE (2002). Estudio de factibilidad para la implementación de seguros basados en Índices climáticos en el cultivo de Café en Honduras y Nicaragua Pp .67.

CENTA. (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal). (2002). Guía técnica del cultivo de plátano. Disponible en: <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/frutales/platano.pdf>. L

Genicafé (1982). El área foliar y productividad del cafeto. Fito fisiología del centro nacional de investigaciones de café. Colombia.

Chipana, G. (2015). Comportamiento agronómico de ocho variedades de soya (*Glycine max*) en relación las tres densidades de siembra, en la Estación Experimental de Sapecho Alto Beni – La Paz. Facultad de Agronomía – UMSA. La Paz – Bolivia. 85 p.

Chipana, R. (1996). Principios de riego y drenaje. Universidad Mayor de San Andrés, facultad de agronomía. La Paz - Bolivia.

Christiansen, J.E. (1942). Irrigación por aspersion. Cali Boletín de la Estación Experimental Agrícola California. California. 670 p.

Cisneros, R. (2003). Sistemas de riego. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. México.

Cisneros, E. y Martínez, R. (2001). Respuesta del cafeto al riego por goteo en plantaciones de fomento. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 10. Universidad Agraria de La Habana, Cuba.

Crisosto, C. H., Grantz, D. A. y Meinzer, F. C. (1992). Effects of water deficit on flower opening in coffee (*Coffea arabica* L.). Tree Physiology 10(2):127.

CORECAF (Corporación Ecuatoriana de Cafetaleras y Cafetaleros) (2000). Determinación de los parámetros técnicos para plantaciones tradicionales y plantaciones tecnificadas de Café arábigo y robusta. Disponible en: <http://www.corecaf.org/>.

CUMAT-CUTESU (Capacidad de uso mayor de la tierra). (2001). Proyecto Alto Beni. Informe técnico. La Paz, Bolivia. 146 p.

Duicela, L. (2001). Guía para el caficultor ecuatoriano. Producción de Café arábigo guía para el agricultor ecuatoriano Portoviejo. Ec. COFENAC. p. 98.

Enríquez G., Duicela L., Corral G., y Chilán W. (2014). Control integrados de enfermedades del cafeto In Guía técnica para la producción y postcosecha del Café robusta. Portoviejo, Ec. COFENAC, Solubles Instantáneos. p. 167-179.

Enríquez, G. (1993). Ecofisiología del cultivo. Manual del cultivo de Café. INIAP, FUNDAGRO, GTZ. Quevedo. p. 29-36.

FAO (2008). Obtenido de <http://www.fao.org/3/>.

FAO (1998). Evapotranspiración del cultivo, estudio de riego y drenaje. Guía 56 para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma-Italia.

FAO (2009). Adaptación de la agricultura al cambio climático. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/tci/pdf/backgroundnotes/webposting_SP.pdf

FAO (2017). Propiedades del suelo. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/soilsurvey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.

Fernández, R., Oyonarte, N., García, j., Yruela, M. y Milla, M. (2010). Manual de riego para agricultores. Riego por aspersión. Andalucía. Consejería de agricultura y pesca. Ed. Andalucía. Sevilla. p. 19-48.

Ferreyra, E. (2005). Manejo del riego localizado y fertirrigación. La Cruz, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 126. 56 p.

Fuentes, J. (2000). Técnicas de Riego. Cuarta edición. Ministerio de Agricultura y Pesca. España ed. por Mundi-prensa. . p 235-279.

- Fuentes, J. (2004). Técnicas de Riego. 4 ed. España. Mundi-prensa Madrid. p. 45.
- Gispert, F. y Joan, R. (2008). Investigación para Caracterizar el Volumen de Suelo Húmedo (VSH) en Riego Localizado. Influencia del VSH en Olivo (*Olea europea* L.), Manzano (*Malus domestica* BORKH) Y Avellano (*Corylus avellana* L.). Tesis doctoral. Universidad de Lleida. Departamento de Medio Ambiente. Ciencias del suelo. 54-56 p.
- Figuroa, E., Pérez, F. y Godínez, L. (S/f). La producción y el consumo del café. Ecorfan. México. p 6.
- Harrington, G.J. (1971). La mecánica de las esclusas de aire en tubos de pequeño diámetro. Nueva Zelanda. Instituto de ingeniería agrícola. Informe interno N° 2.
- Hernández, R. Fernández, C. y Baptista (2014) Metodología de la investigación disponible:
https://www.esup.edup/descargas/dep_investigacion/mMetodologia%20de%20la%20investigaci%C3%B3n%205ta%20C3%B3n.pdf
- Hull, P.J. (1981). Un sistema de riego a baja presión para cultivos de árboles frutales y plantaciones. Ingeniería agrícola. p. 55-58.
- Jácome, J.G. (2009). Estudio de los sistemas de riego localizado por goteo y exudación en el rendimiento de cultivo de lechuga bajo invernadero. Ecuador. p. 25-31.
- Keller, J. y Karmeli, D. (1974). Parámetros de diseño de riego por goteo. Transacción de la ASAE. Vol. 17 (4), p. 678-684.
- Keller, J. y Bliesner, R.D. (1990). Riego. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- Lamm, F.R., Ayars, J. E. y Nakayama, F. S. (2007). Riego para la producción de cultivos, diseño, operación y manejo. Italia. p. 533-570.
- Loli, O. (2012). Guía técnica análisis de suelos y fertilización en el cultivo de café. Oficina académica de extensión y proyección social. Tocache San Martin. Perú.
- Lopez, J. R. (1992). Riego. Madrid, Mundi - Prensa, 1992. 405 p.

- Méndez, I. (2011). Paquete tecnológico café robusta. Programa estratégico para el desarrollo rural sustentable de la región sur. México.
- Mestre, M. A. y Ospina H. F. (1994). Manejo de los cafetales para estabilizar la producción en las fincas cafeteras. Avances Técnicos Cenicafé. No. 201:1-8.
- Merriam, J. L. y Keller, J. (1978). Farm irrigation system evaluation: A guide for management, USA.
- Miranda, R. (2004). Introducción a la geología agrícola. La Paz – Bolivia. 29 pp.
- Moya, T. (2009). Riego localizado y fertirrigación. Temas 5 al 12, Ed. Mundi Prensa, 2º Edición, Madrid-Barcelona-México.
- Ortiz, V. B. (1984). Edafología. 4ta ed. México. 374 p.
- PIAF (Programa de Aprovechamiento Forestal Bo.) (2001). El Ceibo Guía de especies forestales del Alto Beni La Paz, Bolivia. 19 p.
- Puerta, G. I. (2000). Influencia de los granos de Café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida. Cenicafé 51(2):136-150.
- Rawlins, S.L. (1977). Riego uniforme con sistema de burbujeo de baja carga. Gestión de la agricultura y el agua. ed. El sevier. Ámsterdam. Vol. 1, p. 166-178.
- Ramírez, J. E. (1996). Estudios de Sistemas de Podas de Café Por Hileras y Por Lotes. Agronomía Costarricense 20(2):167-172.
- Reynolds, C.A. (1993). Diseño y evaluación de sistema de riego por burbujeo. M.SC. inédito Tesis, Universidad de Arizona. Departamento de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería.
- Reynolds, C. A., Yitayew, M. y Peterson M. S. (1995). Sistemas de riego por burbujeo de cabezal bajo. Parte I: Diseño. Agricultura y Agua Administración. Vol 29: 1-24.
- Rubens, S. (1988). Crecimiento e producao de cafeeiro e cultivos intercaleres sub diferentes regímenes hídricos. Anais do VIII Congresso Nacional de Irrigacao e Drenagem, vol. 1, 41-46, 1988.

Santos, L. y Picornell, M. (2010). El riego y sus tecnologías. ed. castellano. Lisboa. Portugal.

Schwankl, L. J., Hanson, B.R. 2007. Surface drip irrigation. Microirrigation for crop production, Eds. Lamm, F.R., Ayars, J.E., and Nakayama, F.S. Elsevier, 431,472 p.

SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). (2019). Datos climáticos de Alto Beni. La Paz, Bolivia. 18 p.

USDA. (1999). Un cultivo de cobertura para los sistemas tropicales y del sur. Instituto de calidad del suelo, nota técnica agronómica N° 10.

USDA. (2006). Requerimiento de Agua para Riego. Parte 623. Manual Nacional de Ingeniería.

Valencia, A. (1973). Relación entre el índice de área foliar y la productividad del cafeto. Cenicafe 24(4): 79-89.

Vásquez, M. A. (2002). Estudio semi detallado de suelos de las colinas de San Antonio, Porvenir y Litoral. Informe consultoría. San José. Costa Rica. 40 p.

Villca, R. (1996). Evaluación del germoplasma de Achiote (*Bixa orellana*) en la zona de Alto Beni. Tesis de Grado. Universidad Técnica de Oruro. Oruro, Bolivia. 53 p.

Watters, G. Z. y Keller, J. (1978). Hidráulica de tuberías de riego por goteo, ASAE Technical Paper N°. 78-2015. S t. Joseph, Michigan.

Watson, D. J. (1952). The physiological basis of variation in yield. Advances in agronomy. p. 101-144.

Worstell, R. V. (1975). Sistema de información de riego experimental enterrado de múltiples conjuntos. Documento técnico ASAE N° 75-2540. S t. Joseph, Michigan.

Yitayew, M. (1995). Sistemas de irrigación con burbujeador de baja carga. Parte II: Problemas de las esclusas de aire. Agricultura y gestión de agua. Vol. 29: 25-35 p.

The logo is an oval emblem. At the top, a green arc contains the text 'FACULTAD DE AGRONOMIA' in grey. In the center, there is a white flower with a yellow center, a green plant, and a map of Bolivia in green and blue. At the bottom, a grey arc contains the text 'U. M. S. A.'. The word 'ANEXOS' is written in large, white, outlined letters across the center of the emblem.

ANEXOS

Anexo 1. Determinación de la textura del suelo por el método de Bouyoucos

Objetivo:

Conocer el contenido porcentual de Arena, Limo y Arcilla del suelo mediante el método de Bouyoucos.

Materiales:

Balanza analítica, tamiz, agua destilada, hexametáfosfato de sodio, vaso precipitado, agitador mecánico, varilla, termómetro, probeta de 1.000 cm³ e hidrómetro.

Procedimiento

- ✓ Se pesaron 50 gramos de TFSA (tierra fina seca al aire) en la balanza analítica.
- ✓ Se colocó la TFSA en un vaso de precipitación y agregó cinco gramos de hexametáfosfato de sodio.
- ✓ Se procedió a agitar la muestra de 15 a 20 minutos.
- ✓ Vertimos la muestra en la probeta graduada de 1.000 cm³.
- ✓ Se agitó la muestra hasta la suspensión total.
- ✓ Se tomó la primera lectura de la densidad y la temperatura a los 40 segundos.
- ✓ Se tomó la segunda lectura de la densidad y temperatura a las dos horas.
- ✓ Por último se realizaron los cálculos para determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla.
- ✓ También se realizó una corrección de las lecturas respecto a la temperatura.

El densímetro está calibrado especialmente para 20°C, si la temperatura es mayor a 20°C la nueva densidad encontrada se le suma a la densidad inicial, pero si la temperatura fuera menor a 20°C la nueva densidad encontrada se le debe restar a la densidad inicial, el factor de corrección es: 0,5 °C → 0,2 g/l.

Resultados:

Muestra de la capa superior del suelo (0 a 30 cm)

Lectura 1:

- $D_1 = 31 \text{ g/l}$
- $T_1 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Lectura 1 corregido:

- $D_{1C} = 34,2 \text{ g/l}$

Porcentaje de limo y arcilla:

$$\%LAR = \frac{D_{1C}}{\text{Masa del suelo}} * 100$$

$$\%LAR = \frac{34,2 \text{ g/l}}{50 \text{ g}} * 100$$

$$\%LAR = 68,4\%$$

Porcentaje de arena:

$$\%A = 100 - \%LAR$$

$$\%A = 100 - 68,4\%$$

$$\%A = 31,6\%$$

Lectura 2:

- $D_2 = 9 \text{ g/l}$
- $T_2 = 28,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Lectura 2 corregido:

- $D_{2C} = 12,4 \text{ g/l}$

Porcentaje de arcilla:

$$\%Ar = \frac{D_{2C}}{\text{Masa del suelo}} * 100$$

$$\%Ar = \frac{12,4 \text{ g/l}}{50 \text{ g}} * 100$$

$$\%Ar = 24,8\%$$

Porcentaje de limo:

$$\%L = \%LAR - \%Ar$$

$$\%L = 68,4\% - 24,8\%$$

$$\%L = 43,6\%$$

$$\mathbf{A = 31,6\% \quad L = 43,6\% \quad Ar = 24,8\%}$$

Muestra de la capa inferior del suelo (30 a 60 cm)

Lectura 1:

- $D_1 = 32 \text{ g/l}$
- $T_1 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$

Lectura 1 corregido:

- $D_{1C} = 35,2 \text{ g/l}$

Porcentaje de limo y arcilla:

$$\%LAR = \frac{D_{1C}}{\text{Masa del suelo}} * 100$$

Lectura 2:

- $D_2 = 8,5 \text{ g/l}$
- $T_2 = 28,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Lectura 2 corregido:

- $D_{2C} = 11,9 \text{ g/l}$

Porcentaje de arcilla:

$$\%Ar = \frac{D_{2C}}{\text{Masa del suelo}} * 100$$

$$\%LAR = \frac{35,2 \text{ g/l}}{50 \text{ g}} * 100$$

$$\%LAR = 70,4\%$$

Porcentaje de arena:

$$\%A = 100 - \%LAR$$

$$\%A = 100 - 70,4\%$$

$$\%A = 29,6\%$$

$$\%LAR = \frac{11,9 \text{ g/l}}{50 \text{ g}} * 100$$

$$\%LAR = 23,8\%$$

Porcentaje de limo:

$$\%L = \%LAR - \%Ar$$

$$\%L = 70,4\% - 23,8\%$$

$$\%L = 46,6\%$$

$$\mathbf{A = 29,6\% \quad L = 46,6\% \quad Ar = 23,8\%}$$

Anexo 2. Determinación de la densidad aparente por el método del cilindro

Objetivo:

Determinar la densidad aparente de cada uno de los estratos del suelo por el método del cilindro.

Materiales:

Muestra de suelo, mufla, balanza analítica, escuadra, espátula y cilindros.

Procedimiento:

- ✓ Primeramente, se procedió a pesar la muestra de suelo húmedo.
- ✓ Posteriormente se coloca la muestra de suelo a la mufla a una temperatura de 105 °C, en un tiempo mínimo de 24 horas.
- ✓ Pasado este tiempo se procedió a pesar la muestra del suelo seco.
- ✓ Luego se debe proceder a calcular el volumen del cilindro.
- ✓ Por último, se debe realizar los cálculos necesarios para conocer la densidad aparente de las muestras.

Resultados:

Muestra de la capa superior (0 a 30 cm)

- Peso del suelo húmedo: $m_{sh} = 135,5 \text{ g}$
- Masa del suelo seco: $m_{ss} = 106,8 \text{ g}$
- Volumen del cilindro: $V_c = 78,08 \text{ cm}^3$

$$Dap = \frac{m_{ss}}{V_c}$$

$$Dap = \frac{106,8 \text{ g}}{78,08 \text{ cm}^3}$$

$$\mathbf{Dap = 1,37 \text{ g/cm}^3}$$

Muestra de la capa superior (30 a 60 cm)

- Peso del suelo húmedo: $m_{sh} = 133,2 \text{ g}$
- Masa del suelo seco: $m_{ss} = 105,4 \text{ g}$
- Volumen del cilindro: $V_c = 78,08 \text{ cm}^3$

$$Dap = \frac{m_{ss}}{V_c}$$

$$Dap = \frac{105,4 \text{ g}}{78,08 \text{ cm}^3}$$

$$\mathbf{Dap = 1,35 \text{ g/cm}^3}$$

Anexo 3. Datos de la prueba de infiltración del suelo

Nº	Tiempo (min)		Lamina (cm)		x	y	X*Y	X^2	Z inf acum	Vinf	
	inst	acum	inst	acum	log T	log L			cm	cm/min	cm/h
	0	0	0	0	-	-	-	-	0	-	0
1	1	1	0,6	0,6	0,00	-0,22	0,00	0,00	0,95	0,39	23,10
2	1	2	0,5	1,1	0,30	0,04	0,01	0,09	1,26	0,25	15,28
3	1	3	0,5	1,6	0,48	0,20	0,10	0,23	1,49	0,20	12,00
4	1	4	0,3	1,9	0,60	0,28	0,17	0,36	1,67	0,17	10,10
5	1	5	0,2	2,1	0,70	0,32	0,23	0,49	1,83	0,15	8,84
6	5	10	0,7	2,8	1,00	0,45	0,45	1,00	2,42	0,10	5,85
7	5	15	0,5	3,3	1,18	0,52	0,61	1,38	2,85	0,08	4,59
8	5	20	0,4	3,7	1,30	0,57	0,74	1,69	3,20	0,06	3,87
9	10	30	0,4	4,1	1,48	0,61	0,91	2,18	3,76	0,05	3,04
10	10	40	0,6	4,7	1,60	0,67	1,08	2,57	4,23	0,04	2,56
11	10	50	0,4	5,1	1,70	0,71	1,20	2,89	4,63	0,04	2,24
12	15	65	0,4	5,5	1,81	0,74	1,34	3,29	5,14	0,03	1,91
13	15	80	0,3	5,8	1,90	0,76	1,45	3,62	5,59	0,03	1,69
14	30	110	0,3	6,1	2,04	0,79	1,60	4,17	6,36	0,02	1,40
15	30	140	0,2	6,3	2,15	0,80	1,72	4,61	7,01	0,02	1,21
16	60	200	0,5	6,8	2,30	0,83	1,92	5,29	8,09	0,02	0,98
17	90	290	0,5	7,3	2,46	0,86	2,13	6,06	9,40	0,01	0,78
				68,80	23,00	8,94	15,64	39,92			

Determinación de parámetros “a y b”:

$$A = \frac{(\sum x^2 * \sum y) - (\sum x * \sum xy)}{(N * \sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$B = \frac{(N * \sum xy) - (\sum x * \sum y)}{(N * \sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$A = \frac{(39,92 * 8,94) - (23 * 15,64)}{(17 * 39,92) - (23)^2}$$

$$B = \frac{(17 * 15,64) - (23 * 8,94)}{(17 * 39,92) - (23)^2}$$

$$A = -0,020$$

$$B = 0,403$$

$$a = (10)^{-A}$$

$$b = B$$

$$a = 0,955$$

$$b = 0,403$$

Determinación de lámina de infiltración acumulada:

$$Z_{inf} = a(T)^b$$

Determinación de la velocidad de infiltración:

$$V_{inf} = K_i(T)^n$$

$$K_i = a * b \qquad n = b - 1$$

$$K_i = 0,955 * 0,403 \qquad n = 0,403 - 1$$

$$K_i = 0,385 \qquad n = -0,597$$

Determinación de la velocidad de infiltración básica:


$$T_b = 10 * n \qquad VIB = K_i(T_b)^n$$

$$T_b = 10 * (-0,527) \qquad VIB = 0,385 * (5,97)^{-0,597}$$

$$T_b = 5,97 \text{ h} \qquad VIB = 6,92 \text{ mm/h}$$

Anexo 4. Información general del sitio de la muestra

1. INFORMACION GENERAL DEL SITIO DE LA MUESTRA									
Fecha:	15/09/2020	No perfil:	1	Latitud S:	15°33'49"	longitud O:	67°19'12"		
Altitud:	410 msnm	Responsable:	Tesisista			No de carta:			
Nombre Local del suelo y ubicación:	Parcela agroforestal de Café, parcela A, ubicada en la entrada Mara								
2. FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO									
Condición climática actual		R. de temp. del suelo		R. de hum. suelo		Geoforma		%	
SU: Soleado	x	PG: Pergélico (<0 oC)		AQ: Acuico		LL: Meseta			
PC: Parcialmente nublado		CR: Criico (<0 oC)		DU: Udico	x	LD: Depresión			
OV: Nublado		FR: Frigido (0 - 8 oC)		US: Ustico		LV: Piso de valle			
RA: Lluvioso		ME: Mésico (8 - 15 oC)	x	XE: Xerico		Serrania			
SL: Granizo		TH: Térmico (15 - 22 oC)		AR: Aricico		Ladera Alta			
SN: Nieve		HT: Hipertermico >22 oC				Ladera Media			
Usos de la Tierra y vegetación:					Mat. Parental		Ladera Baja		
Cultivos Anuales:				R. Ignea					
Cultivos Perennes:	café			R. Metamorf.					
Cultivos arboreos:				R. sediment.		x			
Ganadería:				Origen:		No consolidado			
Forestal:	Motacu	Ceibo	Chima	Fluvial	x	Lacustre:		Glacial:	
Industria:				Coluvial		Eólico:			
Riego:			Cobertura:						
DESCRIPCIÓN DEL SUELO									
Condiciones de humedad del perfil del suelo:									
Profundidad efectiva (cm):		44		Profundidad Napa Freática (cm):					
Drenaje:	Piedras (15-30cm)		Rocas (>30cm)		Erosión Hídrica (%)		Erosión eólica (%)		
Clase 0	Clase 0 (<0,01%)		Clase 0 (<2%)		Sin evidencias		x		Acumulación de arena: x
Clase 1	x	Clase 1 (0,01-0,1%)		x	Clase 1 (2 - 10)		E. Láminar:		Deposición de sales:
Clase 2		Clase 2 (0,1-3%)			Clase 2 (10 - 25%)		E. surcos:		Costras en superficie:
Clase 3		Clase 3 (3-15%)			Clase 3 (25 - 50%)		E. Cárcavas		Meses inundados/año:
Clase 4		Clase 4 (15 - 90%)			Clase 4 (50 - 90%)		Número Fotografía:		Fotografía del sitio
Clase 5		Clase 5 (>90%)			Clase 5 (>90%)				
Costras en superficie (mm)		Grietas en superficie (ancho)		Salinidad					
N: Ninguno		x	F. Fino < 1 mm		x	Ninguno 0-2%		x	
F: Delgado (<2 mm)			M: Medio 1-2 mm			Bajo 2-15%			
M: Medio (2-5mm)			W: Ancho 2-5 mm			Moderado 15-40%			
C: Grueso (5-20 mm)			E: Extr. Ancho >10			Alto 40 -80%			
V: Muy grueso (>20)						Dominante >80%			
Observaciones:									



Anexo 5. Descripción morfológica del suelo del sitio de muestra

Descripción morfológica del suelo					
Nro. De perfil			Descripción		
	Horizonte		H1	H2	H3
	Símbolo		A	B	C1
Profundidad del horizonte		Cm	0 - 14	14 - 45	> 45
Textura	Clase textural	---	Far	Far	Ar
Color	Seco	---	---	---	---
	Húmedo	---	---	---	---
*manchas o moteados	Proporción	%	---	1	---
	Tamaño	Mm	---	7	---
	Denominación		---	Negro	---
*fragmentos gruesos	Proporción	%	---	---	---
	Tamaño	Cm	---	---	---
	Forma	---	---	---	---
*estructura	Tipo	---	Granular	Sub granular	Sin estructura
	Grado	---	Moderado	Fuerte	---
	Clase	Mm	1 - 5	> 10	---
		Denominación	Medio	Grueso	---
*consistencia	Mojado	Adhesividad	Adhesivo	Muy adhesivo	Muy adhesivo
		Plasticidad	Plástico	Plástico	Muy plástico
	Húmedo	---	Friable	Poco friable	Firme
	Seco	---	Ligeramente dura	Dura	Extremadamente dura
Carbonatos	(NC, LC, MC, FC, EC)		---	---	---
Raíces	Tamaño /cantidad	< 1 mm (%)	70	5	0
		1 - 2 mm (%)	20	5	1
		2 - 5 mm (%)	10	2	1
		> 5 mm (%)	10	1	0
Presencia de lombrices u otros		No/Ho	Hormigas	---	---
Porosidad (lupa)	Tamaño /cantidad	< 1 mm (%)	35	55	10
		1 - 2 mm (%)	20	20	2
		2 - 5 mm (%)	5	5	1
		> 5 mm (%)	1	5	0
Limite	-----	---	Continuo	Continuo	Continuo
Prof. Napa freática	Cm	---	-	-	-
Observaciones:					

Anexo 6. Valores de coeficientes del cultivo, Kc

Cultivo		$K_{C\text{INI}}$	$K_{C\text{MED}}$	$K_{C\text{FIN}}$	Altura Máx. Cultivo (m)
<i>j. Forrajes</i>					
Alfalfa (heno)	- efecto promedio de los cortes	0,40	0,95	0,90	0,7
	- periodos individuales de corte	0,40	1,20	1,15	0,7
	- para semilla	0,40	0,50	0,50	0,7
Bermuda (heno)	- efecto promedio de los cortes	0,55	1,00	0,85	0,4
	- cultivo para semilla (primavera,	0,35	0,90	0,65	0,4
Trébol (heno, Bersin)	- efecto promedio de los cortes	0,40	0,90	0,85	0,6
	- periodos individuales de corte	0,40	1,15	1,10	0,6
Rye Gras (heno)	- efecto promedio de los cortes	0,95	1,05	1,00	0,3
Pasto del sudán (anual)	- efecto promedio de los cortes	0,50	0,90	0,85	1,2
	- periodos individuales de corte	0,50	1,15	1,10	1,2
Pasto de pastoreo	- pasto de rotación	0,40	0,85 - 1,05	0,85	0,15 - 0,30
	- pastoreo extensivo	0,30	0,75	0,75	0,1
Pastos (cesped, turfgrass)	- época fría	0,90	0,95	0,95	0,1
	- época caliente	0,80	0,85	0,85	0,1
k. Caña de azúcar		0,40	1,25	0,75	3
<i>l. Frutas tropicales y arboles</i>					
Banana	- primer año	0,50	1,10	1,00	3
	- segundo año	1,00	1,20	1,10	4
Cacao		1,00	1,05	1,05	3
Café	- suelo sin cobertura	0,90	0,95	0,95	1 - 2
	- con malezas	1,05	1,10	1,10	1 - 2
Palma datilera		0,90	0,95	0,95	8
Palmas		0,95	1,00	1,00	8
Piña	- suelo sin cobertura	0,50	0,30	0,30	0,60 - 1,20
	- con malezas	0,50	0,50	0,50	0,60 - 1,20
Arbol del caucho		0,95	1,00	1,00	10
Té	- no sombreado	0,95	1,00	1,00	1,5
	- sombreado	1,10	1,15	1,15	2
<i>m. Uvas y moras</i>					
Moras (arbusto)		0,30	1,50	0,50	1,5
Uvas	- mesa o secas (pasas)	0,30	0,85	0,45	2
	- vino	0,30	0,70	0,45	1,50 - 2
Lúpulo		0,30	1,05	0,85	5

Fuente: Guía de riego y drenaje (FAO, 1998).

Anexo 7. Láminas de riego aplicados al tratamiento por planta

Meses	Fecha	Fr (días)	Etapa de desarrollo	Kc (coef.)	ETo (mm)	PP (mm)	PP 80% (mm)	Lámina requerida (mm)	Lámina aplicada (mm)	Lámina aplicada (l/planta)
Septiembre	19 al 21	3	Inicio	1,05	15,5	6,2	5,0	11,5	6,5	20,3
	22 al 24	3	Inicio	1,05	15,5	0,2	0,1	11,5	11,3	35,5
	25 al 27	3	Inicio	1,05	15,5	0,0	0,0	11,5	11,5	36,0
	28 al 30	3	Inicio	1,05	15,5	6,8	5,4	11,5	6,0	19,0
Octubre	1 al 3	3	Inicio	1,05	17,7	0,0	0,0	13,1	13,1	41,2
	4 al 6	3	Inicio	1,05	17,7	8,7	6,9	13,1	6,2	19,4
	7 al 9	3	Inicio	1,05	17,7	0,0	0,0	13,1	13,1	41,2
	10 al 12	3	Inicio	1,05	17,7	6,9	5,5	13,1	7,6	23,9
	13 al 15	3	Inicio	1,05	17,7	0,2	0,1	13,1	13,0	40,8
	16 al 18	3	Inicio	1,05	17,7	26,0	20,8	13,1	-7,7	0,0
	19 al 21	3	Inicio	1,05	17,7	0,8	0,6	13,1	12,5	39,3
	22 al 24	3	Inicio	1,05	17,7	1,1	0,9	13,1	12,3	38,5
	25 al 27	3	Inicio	1,05	17,7	0,0	0,0	13,1	13,1	41,2
28 al 30	3	Inicio	1,05	17,7	0,0	0,0	13,1	13,1	41,2	
Noviembre	31 al 2	3	Desarrollo	1,10	18,2	0,0	0,0	14,1	14,1	44,3
	3 al 5	3	Desarrollo	1,10	18,4	0,0	0,0	14,3	14,3	44,9
	6 al 8	3	Desarrollo	1,10	18,4	0,0	0,0	14,3	14,3	44,9
	9 al 11	3	Desarrollo	1,10	18,4	2,8	2,2	14,3	12,1	38,0
	12 al 14	3	Desarrollo	1,10	18,4	9,6	7,7	14,3	6,6	20,8
	15 al 17	3	Desarrollo	1,10	18,4	0,0	0,0	14,3	14,3	44,9
	18 al 20	3	Desarrollo	1,10	18,4	0,4	0,3	14,3	14,0	43,9
	21 al 23	3	Desarrollo	1,10	18,4	1,3	1,0	14,3	13,3	41,7
	24 al 26	3	Desarrollo	1,10	18,4	2,2	1,8	14,3	12,5	39,3
27 al 29	3	Desarrollo	1,10	18,4	2,8	2,3	14,3	12,0	37,8	
Diciembre	30 al 2	3	Desarrollo	1,10	18,6	14,0	11,2	14,5	3,3	10,3
	3 al 5	3	Desarrollo	1,10	18,7	2,9	2,3	14,5	12,2	38,4
	6 al 8	3	Desarrollo	1,10	18,7	11,2	9,0	14,5	5,5	17,4
	9 al 11	3	Desarrollo	1,10	18,7	7,0	5,6	14,5	8,9	28,1
	12 al 14	3	Desarrollo	1,10	18,7	1,0	0,8	14,5	13,7	43,1
	15 al 17	3	Desarrollo	1,10	18,7	9,3	7,5	14,5	7,1	22,2
	18 al 20	3	Desarrollo	1,10	18,7	0,6	0,5	14,5	14,0	44,1
	21 al 23	3	Desarrollo	1,10	18,7	0,5	0,4	14,5	14,1	44,3
	24 al 26	3	Desarrollo	1,10	18,7	10,7	8,5	14,5	6,0	18,9
27 al 29	3	Desarrollo	1,10	18,7	23,2	18,6	14,5	-4,0	0,0	
30 al 1	3	Desarrollo	1,10	18,7	31,8	25,4	14,5	-10,9	0,0	
Enero	2 al 4	3	Desarrollo	1,10	18,6	2,7	2,1	14,5	12,3	38,7
	5 al 7	3	Desarrollo	1,10	18,6	38,0	30,4	14,5	-15,9	0,0
	8 al 10	3	Desarrollo	1,10	18,6	1,4	1,1	14,5	13,3	41,8
	11 al 13	3	Desarrollo	1,10	18,6	7,0	5,6	14,5	8,9	27,8
	14 al 16	3	Desarrollo	1,10	18,6	5,9	4,7	14,5	9,8	30,7
	17 al 19	3	Desarrollo	1,10	18,6	22,0	17,6	14,5	-3,1	0,0
	20 al 22	3	Desarrollo	1,10	18,6	0,1	0,1	14,5	14,4	45,2
	23 al 25	3	Desarrollo	1,10	18,6	9,3	7,5	14,5	7,0	22,0
26 al 28	3	Desarrollo	1,10	18,6	8,3	6,6	14,5	7,8	24,6	
29 al 31	3	Desarrollo	1,10	18,6	4,4	3,5	14,5	10,9	34,4	
Total										1369,8
Total, aplicados al tratamiento										54792,6

Anexo 8. Procesamiento de datos de la evaluación del sistema de riego

Posición del emisor en el lateral	Posición del lateral			Caudal ascendente	Xi - X	
	1					
	Volumen (cm³)	Tiempo (min)	Caudal (l/s)			
1	A	696	1	0,0116	0,0055	0,0032
	B	697	1	0,0116	0,0057	0,0030
	C	697	1	0,0116	0,0057	0,0029
2	A	656	1	0,0109	0,0061	0,0026
	B	658	1	0,0110	0,0062	0,0025
	C	650	1	0,0108	0,0062	0,0025
3	A	634	1	0,0106	0,0063	0,0024
	B	641	1	0,0107	0,0063	0,0024
	C	620	1	0,0103	0,0063	0,0023
4	A	587	1	0,0098	0,0064	0,0023
	B	594	1	0,0099	0,0065	0,0022
	C	581	1	0,0097	0,0065	0,0022
5	A	555	1	0,0093	0,0066	0,0021
	B	562	1	0,0094	0,0066	0,0021
	C	553	1	0,0092	0,0066	0,0020
6	A	516	1	0,0086	0,0067	0,0020
	B	501	1	0,0084	0,0068	0,0019
	C	490	1	0,0082	0,0068	0,0019
7	A	467	1	0,0078	0,0069	0,0018
	B	470	1	0,0078	0,0069	0,0018
	C	462	1	0,0077	0,0069	0,0018
8	A	438	1	0,0073	0,0070	0,0017
	B	430	1	0,0072	0,0070	0,0017
	C	420	1	0,0070	0,0071	0,0016
9	A	413	1	0,0069	0,0071	0,0016
	B	413	1	0,0069	0,0071	0,0016
	C	396	1	0,0066	0,0072	0,0015
10	A	374	1	0,0062	0,0072	0,0015
	B	374	1	0,0062	0,0072	0,0014
	C	367	1	0,0061	0,0073	0,0014

(Continuación de anexo 8)

Posición del emisor en el lateral	Posición del lateral			Caudal ascendente	Xi - X	
	2					
	Volumen (cm³)	Tiempo (min)	Caudal (l/s)			
1	A	695	1	0,0116	0,0073	0,0014
	B	697	1	0,0116	0,0073	0,0013
	C	683	1	0,0114	0,0073	0,0013
2	A	663	1	0,0110	0,0074	0,0013
	B	659	1	0,0110	0,0074	0,0012
	C	656	1	0,0109	0,0074	0,0012
3	A	644	1	0,0107	0,0076	0,0010
	B	636	1	0,0106	0,0077	0,0010
	C	623	1	0,0104	0,0077	0,0010
4	A	595	1	0,0099	0,0077	0,0010
	B	587	1	0,0098	0,0078	0,0009
	C	568	1	0,0095	0,0078	0,0009
5	A	561	1	0,0093	0,0078	0,0009
	B	568	1	0,0095	0,0078	0,0009
	C	563	1	0,0094	0,0079	0,0008
6	A	512	1	0,0085	0,0079	0,0008
	B	519	1	0,0087	0,0080	0,0007
	C	494	1	0,0082	0,0080	0,0007
7	A	500	1	0,0083	0,0080	0,0007
	B	497	1	0,0083	0,0080	0,0006
	C	482	1	0,0080	0,0082	0,0005
8	A	465	1	0,0078	0,0082	0,0005
	B	458	1	0,0076	0,0082	0,0004
	C	462	1	0,0077	0,0083	0,0004
9	A	446	1	0,0074	0,0083	0,0004
	B	446	1	0,0074	0,0083	0,0004
	C	433	1	0,0072	0,0084	0,0003
10	A	419	1	0,0070	0,0084	0,0003
	B	412	1	0,0069	0,0084	0,0003
	C	409	1	0,0068	0,0085	0,0002

(Continuación de anexo 8)

Posición del emisor en el lateral	Posición del lateral			Caudal ascendente	Xi - X	
	3					
	Volumen (cm³)	Tiempo (min)	Caudal (l/s)			
1	A	683	1	0,0114	0,0085	0,0001
	B	676	1	0,0113	0,0086	0,0001
	C	662	1	0,0110	0,0086	0,0001
2	A	641	1	0,0107	0,0087	0,0000
	B	641	1	0,0107	0,0087	0,0001
	C	621	1	0,0104	0,0088	0,0001
3	A	586	1	0,0098	0,0088	0,0001
	B	593	1	0,0099	0,0089	0,0002
	C	574	1	0,0096	0,0089	0,0003
4	A	544	1	0,0091	0,0090	0,0003
	B	551	1	0,0092	0,0091	0,0004
	C	540	1	0,0090	0,0092	0,0005
5	A	525	1	0,0087	0,0092	0,0005
	B	528	1	0,0088	0,0093	0,0006
	C	511	1	0,0085	0,0093	0,0007
6	A	498	1	0,0083	0,0094	0,0007
	B	490	1	0,0082	0,0094	0,0007
	C	480	1	0,0080	0,0094	0,0007
7	A	478	1	0,0080	0,0095	0,0008
	B	478	1	0,0080	0,0095	0,0008
	C	475	1	0,0079	0,0096	0,0009
8	A	437	1	0,0073	0,0097	0,0010
	B	444	1	0,0074	0,0097	0,0010
	C	434	1	0,0072	0,0097	0,0010
9	A	424	1	0,0071	0,0098	0,0011
	B	424	1	0,0071	0,0098	0,0011
	C	408	1	0,0068	0,0098	0,0011
10	A	390	1	0,0065	0,0099	0,0012
	B	390	1	0,0065	0,0099	0,0012
	C	377	1	0,0063	0,0099	0,0012

(Continuación de anexo 8)

Posición del emisor en el lateral	Posición del lateral			Caudal ascendente	Xi - X	
	4					
	Volumen (cm³)	Tiempo (min)	Caudal (l/s)			
1	A	669	1	0,0111	0,0102	0,0016
	B	669	1	0,0111	0,0102	0,0016
	C	648	1	0,0108	0,0103	0,0017
2	A	615	1	0,0102	0,0104	0,0017
	B	622	1	0,0104	0,0104	0,0017
	C	614	1	0,0102	0,0104	0,0017
3	A	583	1	0,0097	0,0106	0,0019
	B	583	1	0,0097	0,0106	0,0019
	C	564	1	0,0094	0,0107	0,0020
4	A	532	1	0,0089	0,0107	0,0020
	B	536	1	0,0089	0,0107	0,0020
	C	525	1	0,0088	0,0107	0,0020
5	A	515	1	0,0086	0,0108	0,0021
	B	505	1	0,0084	0,0108	0,0022
	C	501	1	0,0084	0,0109	0,0022
6	A	473	1	0,0079	0,0109	0,0023
	B	470	1	0,0078	0,0110	0,0023
	C	462	1	0,0077	0,0110	0,0023
7	A	441	1	0,0073	0,0110	0,0024
	B	441	1	0,0073	0,0110	0,0024
	C	424	1	0,0071	0,0111	0,0025
8	A	399	1	0,0066	0,0111	0,0025
	B	402	1	0,0067	0,0113	0,0026
	C	395	1	0,0066	0,0114	0,0027
9	A	384	1	0,0064	0,0114	0,0027
	B	380	1	0,0063	0,0116	0,0029
	C	375	1	0,0063	0,0116	0,0029
10	A	345	1	0,0057	0,0116	0,0029
	B	341	1	0,0057	0,0116	0,0029
	C	329	1	0,0055	0,0116	0,0029

Anexo 9. Datos de evaluación de área foliar de la planta

N°	Sin riego			Con riego		
	AF 1° medición (m²)	AF 2° medición (m²)	T0 (1° - 2°)	AF 1° medición (m²)	AF 2° medición (m²)	T1 (1° - 2°)
1	1,16	2,38	1,22	1,46	3,93	2,47
2	1,24	2,54	1,30	1,68	4,19	2,51
3	1,70	3,59	1,89	1,10	3,79	2,69
4	2,60	4,94	2,34	1,98	5,19	3,21
5	2,76	4,66	1,90	1,35	4,03	2,68
6	1,45	2,94	1,49	1,88	5,68	3,80
7	2,47	4,03	1,56	1,51	4,22	2,71
8	3,16	5,79	2,63	1,20	3,83	2,63
9	1,75	3,72	1,97	1,18	4,32	3,14
10	2,44	4,57	2,13	2,01	4,61	2,60
11	1,85	3,93	2,08	1,78	4,52	2,74
12	0,84	2,44	1,60	1,33	3,84	2,51
13	1,39	3,18	1,79	1,55	4,29	2,74
14	1,27	3,54	2,27	0,76	3,63	2,87
15	1,34	3,38	2,04	1,03	3,85	2,82
16	1,98	4,55	2,57	1,46	4,42	2,96
17	2,01	4,94	2,93	1,18	3,98	2,80
18	1,36	3,22	1,86	2,03	5,55	3,52
19	1,61	4,02	2,41	1,28	4,55	3,27
20	1,84	4,05	2,21	1,23	3,78	2,55

Anexo 10. Datos de evaluación de número de nudos

N°	Sin riego				Con riego			
	a	b	c	T0	a	b	c	T1
1	2,24	2,65	2,45	2,44	2,83	3,00	3,32	3,05
2	2,24	2,83	2,45	2,50	3,16	3,32	3,16	3,21
3	2,65	2,83	2,45	2,64	3,16	3,16	3,32	3,21
4	2,65	2,83	2,65	2,71	2,83	3,46	3,46	3,25
5	2,83	2,65	2,83	2,77	3,00	3,61	3,46	3,36
6	2,65	2,83	2,65	2,71	3,61	3,74	3,46	3,60
7	2,83	3,00	2,83	2,89	3,16	3,46	3,46	3,36
8	2,83	3,00	2,83	2,89	3,16	3,46	3,32	3,31
9	2,45	3,00	2,83	2,76	3,61	3,61	3,74	3,65
10	2,83	2,65	2,83	2,77	2,83	2,65	3,61	3,03
11	3,16	2,83	2,65	2,88	2,65	2,83	3,46	2,98
12	2,83	3,00	3,00	2,94	3,16	3,46	3,46	3,36
13	2,65	2,83	3,00	2,82	3,00	3,61	3,46	3,36
14	2,83	2,83	3,16	2,94	3,16	3,32	3,16	3,21
15	2,83	2,65	3,00	2,82	3,32	3,32	3,61	3,41
16	3,46	3,00	2,83	3,10	3,16	3,32	3,46	3,31
17	3,00	2,83	3,16	3,00	3,46	3,16	3,16	3,26
18	3,00	3,00	2,65	2,88	3,16	3,61	3,16	3,31
19	2,83	3,00	2,83	2,89	3,46	3,00	3,46	3,31
20	2,83	2,65	2,83	2,77	3,00	3,46	3,32	3,26

Anexo 11. Datos de evaluación de longitud de bandolas

N°	Sin riego (cm)				Con riego (cm)			
	a	b	c	T0	a	b	c	T1
1	24	28	27	26,33	40	44	50	44,67
2	14	32	25	23,67	39	41	36	38,67
3	27	19	29	25,00	35	36	39	36,67
4	22	21	29	24,00	39	44	48	43,67
5	25	18	19	20,67	43	48	36	42,33
6	17	21	27	21,67	39	41	43	41,00
7	22	26	24	24,00	48	36	39	41,00
8	23	28	26	25,67	48	35	37	40,00
9	22	28	32	27,33	48	39	43	43,33
10	17	18	22	19,00	37	40	43	40,00
11	21	23	26	23,33	38	37	40	38,33
12	25	28	29	27,33	46	37	37	40,00
13	25	21	31	25,67	39	36	47	40,67
14	21	23	28	24,00	41	44	32	39,00
15	25	19	28	24,00	42	43	35	40,00
16	28	31	31	30,00	46	36	41	41,00
17	21	28	27	25,33	42	40	39	40,33
18	28	26	33	29,00	42	40	37	39,67
19	24	26	28	26,00	44	36	33	37,67
20	25	22	28	25,00	41	40	34	38,33

Anexo 12. Datos de evaluación de derrame productivo

N°	Sin riego				Con riego			
	a	b	c	T0	a	b	c	T1
1	3,08	2,74	3,39	3,07	2,35	2,35	1,58	2,09
2	3,24	3,08	3,08	3,13	1,58	2,35	2,12	2,02
3	3,08	3,39	3,08	3,19	2,12	1,58	2,35	2,02
4	3,08	2,92	3,39	3,13	2,12	2,12	1,87	2,04
5	3,54	2,74	2,92	3,06	2,12	2,12	2,12	2,12
6	2,92	3,54	3,08	3,18	2,12	2,12	1,87	2,04
7	3,08	2,74	3,08	2,97	1,58	1,58	1,58	1,58
8	2,74	3,08	3,39	3,07	1,58	2,35	2,12	2,02
9	3,08	3,24	3,08	3,13	2,12	1,58	2,55	2,08
10	2,74	2,92	2,92	2,86	2,12	1,87	2,12	2,04
11	3,39	3,24	2,92	3,18	1,87	1,87	1,22	1,66
12	3,24	2,74	2,74	2,91	2,35	1,22	2,12	1,90
13	3,08	2,74	2,92	2,91	2,35	2,35	2,12	2,27
14	2,92	2,74	2,92	2,86	1,22	2,35	1,87	1,81
15	3,08	2,92	3,08	3,03	2,35	2,12	1,58	2,02
16	3,08	3,24	2,92	3,08	2,12	2,35	2,35	2,27
17	2,92	2,74	2,92	2,86	2,35	2,35	1,58	2,09
18	3,08	3,24	3,54	3,29	2,35	1,87	1,22	1,81
19	2,92	3,08	2,92	2,97	2,12	1,58	1,58	1,76
20	3,24	2,74	3,08	3,02	1,58	1,87	2,35	1,93

Anexo 13. Presupuesto para la implementación del sistema de riego por borboleamiento

Material	Unidad	Cantidad	Precio unitario (Bs)	Precio total (Bs)
Tanque de 2300 litros	Unid.	1	2.200	2.200
Tubo de polietileno de ¾" de diámetro	m	114	1.40	160
Tubo de PVC de 1½" de diámetro	Unid.	6	30	180
Te de PP de 5 mm con púas	Unid.	40	2	80
Tapón de 1½" de diámetro	Unid.	1	4	4
Tapones de ¾" de diámetro	Unid.	4	2.5	10
Llave de paso de 1½"	Unid.	1	35	35
Llaves de paso de ¾"	Unid.	2	25	50
Collarines de toma 1½" x ¾"	Unid.	4	30	120
Manguera PVC de pared delgada	m	200	2	400
Pegamento PVC	Unid.	1	10	10
Teflón	Unid.	5	2	10
Total				3.259

Anexo 14. Álbum de fotografías



Excavación de la calicata para realizar evaluación del suelo.



Determinación de la textura de las muestras de suelo por el método de Bouyoucos.



Determinación de la densidad aparente de las muestras de suelo.



Evaluación de la infiltración del suelo en el área de estudio.



Instalación del sistema de riego por borboleamiento.



Toma de datos de las variables vegetativas del cultivo.



Evaluación del sistema de riego por borboleamiento.