



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Agrícola

Determinación de la correlación entre demanda atmosférica y contenido de humedad del suelo para establecer la lámina de riego a aplicar en el sistema agroforestal con café (*Coffea arabica* L.) en la Quinta Experimental “La Argelia”

Trabajo de Integración
Curricular, previo a la obtención
del título de Ingeniera Agrícola

AUTORA:

Stefany Lisbeth Andino Armijos

DIRECTOR:

Mg.Sc. Jimmy Cordero Jiménez

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 21 de agosto del 2023

Ing. Jimmy Javier Cordero Jiménez Mg. Sc
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Determinación de la correlación entre la demanda atmosférica y contenido de humedad del suelo para establecer la lámina de riego a aplicar en el sistema agroforestal con café (*Coffea arábica* L.) en la Quinta Experimental “La Argelia”** de autoría de la estudiante **Stefany Lisbeth Andino Armijos**, con cédula de identidad **Nro. 1105814048**, previa a la obtención del título de Ingeniera Agrícola, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Nacional de Loja, apruebo y autorizo su presentación para su respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
**JIMMY JAVIER
CORDERO JIMENEZ**

Ing. Jimmy Javier Cordero Jiménez Mg. Sc

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Stefany Lisbeth Andino Armijos**, declaro ser autora del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula de identidad: 1105814048

Fecha: 06 de febrero de 2024

Correo electrónico: stefany.andino@unl.edu.ec

Teléfono celular: 0963132277

Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **Stefany Lisbeth Andino Armijos** declaro ser autora del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Determinación de la correlación entre la demanda atmosférica y contenido de humedad del suelo para establecer la lámina de riego a aplicar en el sistema agroforestal con café (*Coffea arabica* L.) en la Quinta Experimental “La Argelia”**, cantón y provincia de Loja, como requisito para optar el título de **Ingeniera Agrícola**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional. Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los días del mes de dos mil veinticuatro.



Firma:

Autor: Stefany Lisbeth Andino Armijos

Cédula: 1105814048

Dirección: Sucre, Loja Ecuador

Correo electrónico: stefany.andino@unl.edu.ec

Teléfono celular: 0963132277

DATOS COPLEMENTARIOS

Director del Trabajo de Integración Curricular: Mg.Sc. Jimmy Javier Cordero.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios por las bendiciones que ha derramado en mi vida.

Con profundo amor, dedico este trabajo a mi madre, Mercedes Armijos, cuyo constante apoyo y cariño han sido un impulso para alcanzar mis metas académicas. Su sacrificio y compromiso han sido la fuerza motriz detrás de mi búsqueda de conocimiento y logros académicos.

A mi familia, les dedico este trabajo en reconocimiento a su amor incondicional y el apoyo mutuo que nos brindamos día tras día. Agradezco su aliento constante y la motivación que me dan para perseguir mis objetivos en todo momento.

A mis queridos compañeros, especialmente a Josué y Gina, les expreso mi profundo agradecimiento por ser personas maravillosas que me han acompañado a lo largo de mi carrera. Su ayuda y apoyo han sido invaluable, y me siento afortunado de tenerlos en mi vida.

Stefany Lisbeth Andino Armijos

Agradecimiento

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este Trabajo de Integración.

En primer lugar, quiero expresar mi profunda gratitud a mi director, Jimmy Cordero, cuya orientación experta y paciencia han sido fundamentales para dar forma y mejorar este trabajo.

También deseo reconocer al personal de la Quinta Experimental “La Argelia” de la Universidad Nacional de Loja por proporcionar los recursos y el entorno propicio para llevar a cabo esta investigación.

A los docentes que forman parte de la carrera de Ingeniería Agrícola, quiero expresarles mi reconocimiento por haber contribuido a nuestra formación profesional con sus amplios conocimientos y su ayuda constante.

Stefany Lisbeth Andino Armijos

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de tablas:.....	x
Índice de figuras:.....	xi
Índice de Anexos:.....	xii
1.Título	1
2.Resumen	2
Abstract.....	3
3.Introducción	4
4.Marco teórico	6
4.1.Café.....	6
4.1.1.Descripción general	6
4.1.2. Requerimientos hídricos.....	6
4.2.Recursos para la producción agrícola	6
4.3.Recurso suelo	7
4.3.1.Propiedades químicas	8
4.3.1.1.pH.....	8
4.3.1.2.Capacidad de intercambio catiónico	8
4.3.1.3.Materia orgánica.....	8
4.3.2.Propiedades físicas del suelo	9
4.3.2.1.Textura.....	9
4.3.2.2.Estructura	9
4.3.2.3.Porosidad.....	10
4.3.2.4.Densidad Aparente	10
4.3.2.5.Profundidad de las raíces	10
4.3.2.6.Infiltración.....	11
4.3.3.Relación suelo-agua	12
4.3.3.1.Potencial del agua.....	12
4.3.3.2.Retención del agua por el suelo	12
4.3.3.3.Niveles de humedad del suelo	13

4.3.3.4.Factores que condicionan la capacidad de retención del agua disponible	15
4.3.3.5.Medición de humedad	17
4.4.Recurso agua	18
4.4.1.Calidad del agua de riego	19
4.4.2.Lámina de riego.....	19
4.4.3.Lámina bruta (Lb)	19
4.4.4.Lámina neta (Ln).....	20
4.4.5.Intervalo de riego	21
4.5.Necesidades hídricas de los cultivos.....	21
4.5.1.Evapotranspiración	21
4.5.1.1.Factores que influyen en la evapotranspiración	22
4.5.2.Evapotranspiración del cultivo	22
4.5.3.Evapotranspiración de referencia	23
4.5.4.Coeficiente del cultivo.....	23
4.5.5.Precipitación efectiva	24
4.5.6.Necesidades de riego de los cultivos	24
4.5.7.Métodos para determinar la evapotranspiración	25
4.5.7.1.Tanque evaporímetro tipo A.....	25
4.5.7.2.Métodos indirectos	27
4.6.Modelo de regresión	27
4.6.1.Análisis de correlación	27
4.6.2.Ajuste del modelo de regresión lineal.....	27
5.Metodología	27
5.1.Ubicación del área de estudio	27
5.2.Diseño de la investigación.....	29
5.3.Enfoque de investigación	29
5.4.Materiales y equipos.....	29
5.5.Metodología para el primer objetivo	29
5.5.1.Descripción del perfil del suelo	30
5.5.2.Constantes hidro físicas del suelo.....	30
5.5.3.Evaluación de las condiciones físicas del suelo	31
5.5.4.Velocidad de infiltración	31
5.6.Metodología para el segundo objetivo.....	31
5.6.1.Instalación y calibración de los tensiómetros en campo:	31
5.6.2.Registro de datos del tanque evaporímetro y tensiómetro	32
5.6.3.Calculó de la lámina de riego y tiempo de riego	33
5.6.4.Análisis de datos recolectados	35

6.Resultados	35
6.1.Caracterizar las propiedades hidro físicas del área de estudio	35
6.1.1.Descripción de los perfiles	35
6.1.2.Características hidro físicas del suelo	37
6.1.3.Evaluación de las condiciones físicas del suelo y curva de retención de humedad.....	38
6.1.4.Velocidad de infiltración del agua en el suelo	39
6.2.Determinar el factor de correlación	40
6.2.1.Balance hídrico con registros históricos	40
6.2.2.Balance hídrico	41
6.2.3.Potencial matricial y contenidos de humedad.....	42
6.2.4.Cálculo de la lámina de riego para los tres bloques	43
6.2.5.Consumo de agua mediante registro de tensiómetros en el cultivo de café	45
6.2.6.Correlación entre consumo de agua.....	46
7.Discusión	47
7.1.1.Descripción del perfil	47
7.1.2.Constantes hidro físicas	48
7.1.3.Curva de retención de humedad	48
7.1.4.Velocidad de infiltración	49
7.1.5.Balance hídrico.....	50
7.1.6.Potencial matricial y contenido de humedad	50
7.1.7.Cálculo de la lámina de riego	51
7.1.8.Consumo de agua mediante registro de tensiómetros en el cultivo de café	51
7.1.9.Correlación entre consumo de agua y tanque tipo A	52
8.Conclusiones	53
9.Recomendaciones	54
10.Bibliografía	55
11.Anexos	63

Índice de tablas:

<i>Tabla 1. Clasificación de la porosidad.</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2. Clasificación de profundidad de suelos.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 3. Contenido de agua en CC y PMP en distintas clases texturales.</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 4. Rangos de tensión en el agua del suelo y su interpretación.</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 5. Condiciones climáticas medias anuales en la Quinta Experimental “La Argelia”.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Resultados de las características hidro físicas del suelo.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 7. Evaluación de las condiciones físicas del suelo.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8. Resultados de la velocidad de infiltración básica</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 9. Resultados del balance hídrico.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 10. Resultados del balance hídrico medidos por el tanque y pluviómetro Estación La Argelia.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 11. Ajuste de contenidos de humedad del suelo por medio de las ecuaciones de regresión.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 12. Láminas de riego aplicada en base a diferentes rangos de humedad en el cultivo de café.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 13. Consumo de agua.</i>	<i>45</i>

Índice de figuras:

<i>Figura 1. Diagrama con curvas características del contenido de humedad y tensión para suelos arenosos, arcillosos y francos.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2. Relación general entre el agua disponible para la planta (ADP), la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, el agua no disponible y la clase de textura del suelo.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3. Diagrama de un tensiómetro y de una estación de dos tensiómetros instalados</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4. Factores que afectan la evapotranspiración.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5. Curva generalizada del coeficiente del cultivo.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 6. Características del tanque evaporímetro tipo A.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7. Coeficientes del tanque evaporímetro (K_p) para el tanque Clase A.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8. Mapa de ubicación del proyecto.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9. Perfiles de suelo del área de estudio.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10. Curva de retención de humedad de los tres perfiles del suelo.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 11. Potencial matricial en el cultivo de café.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 12. Correlación entre el consumo de agua bloque 1 y el tanque evaporímetro tipo A.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13. Correlación entre el consumo de agua bloque 2 y el tanque tipo A.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 14. Correlación entre el consumo de agua bloque 3 y el tanque tipo A.</i>	<i>47</i>

Índice de anexos:

<i>Anexo 1. Instalación y calibración de los tensiómetros</i>	63
<i>Anexo 2. Curva del coeficiente Kc del cultivo de café</i>	63
<i>Anexo 3. Diagrama para evaluar las condiciones físicas del suelo</i>	64
<i>Anexo 4. Curva de infiltración del agua en el suelo.</i>	64
<i>Anexo 5. Curva de calibración bloque 1 (25KPa) profundidad 20 cm</i>	65
<i>Anexo 6. Curva de calibración bloque 1 (25KPa) profundidad 40 cm</i>	65
<i>Anexo 7. Curva de calibración bloque 2 (35KPa) profundidad 20 cm</i>	65
<i>Anexo 8. Curva de calibración bloque 2 (35KPa) profundidad 40 cm</i>	66
<i>Anexo 9. Curva de calibración bloque 3 (45KPa) profundidad 20 cm</i>	66
<i>Anexo 10. Curva de calibración bloque 3 (45KPa) profundidad 40 cm</i>	66
<i>Anexo 11. Certificado traducción del resumen</i>	67

1. Título

Determinación de la correlación entre demanda atmosférica y contenido de humedad del suelo para establecer la lámina de riego a aplicar en el sistema agroforestal con café (*Coffea arábica* L.) en la Quinta Experimental “La Argelia”

2. Resumen

La presente investigación se realizó con el fin de obtener la lámina de riego adecuada para el sistema agroforestal de café (*Coffea arabica* L.) con riego por goteo en el sector Los Molinos perteneciente a la Quinta Experimental La Argelia de la Universidad Nacional de Loja, entre los meses de noviembre y diciembre del 2023. Para establecer dicha la lámina de riego del cultivo de café se inició con la determinación de las constantes hidro físicas del suelo (Saturación, CC y PMP), velocidad de infiltración, además se realizó la instalaciones y calibración de los tensiómetros para obtener las ecuaciones de ajuste del contenido de humedad del suelo con el potencial matricial medido. Los niveles de humedad que se evaluaron fueron a: Bloque 1 (-25 kPa); Bloque 2 (-35 kPa) y Bloque 3 (-45 kPa) se reponía continuamente el volumen de agua necesario en base a la lectura de los tensiómetros colocados en cada bloque hasta llegar a CC (10 kPa). De esta manera, el consumo de agua para el bloque B1, B2 y B3 fueron 158 mm, 137 mm y 68 mm respectivamente, aportados en 6, 4 y 1 riegos en los dos meses de evaluación. Mientras que, el requerimiento hídrico con el tanque evaporímetro tipo A fue de 142,9 y 125,7 para el mes de noviembre y diciembre respectivamente, demostrando una baja correlación entre estos dos parámetros. Por ello, al obtener resultados no concluyentes y al evidenciar que hubo un mayor consumo de agua en el T1, por la mayor actividad de las raíces debido a que las plantas sufren menos estrés hídrico al tener un intervalo menor riego frente a los demás tratamientos, se determina que se debe aplicar la lámina del T1 (-10kPa a -25kPa) para el cultivo de café.

Palabras clave: cultivo de café, lámina de riego, tensiómetros, contenido de humedad.

Abstract

The present research was carried out in order to obtain the appropriate irrigation depth for the agroforestry system of coffee (*Coffea arabica* L.) with drip irrigation in the Los Molinos sector belonging to the La Argelia Experimental Farm of the National University of Loja, between the months of November and December 2023. To establish this irrigation depth for coffee cultivation, it began with the determination of the soil hydro-physical constants (Saturation, FC, and PWP), infiltration rate, as well as the installation and calibration of tensiometers to obtain the adjustment equations of soil moisture content with measured matric potential. The moisture levels evaluated were: Block 1 (-25 kPa); Block 2 (-35 kPa); and Block 3 (-45 kPa), continuously replenishing the necessary water volume based on the readings of the tensiometers placed in each block until reaching FC (10 kPa). Thus, the water consumption for blocks B1, B2, and B3 were 158 mm, 137 mm, and 68 mm respectively, provided in 6, 4, and 1 irrigations over the two months of evaluation. Meanwhile, the water requirement with the evaporimeter type A was 142,9 and 125,7 for the months of November and December respectively, showing a low correlation between these two parameters. Therefore, upon obtaining inconclusive results and evidencing that there was a greater water consumption in T1, due to the higher activity of the roots as the plants suffer less water stress with a smaller irrigation interval compared to the other treatments, it is determined that the irrigation depth of T1 (-10kPa to -25kPa) should be applied for coffee cultivation.

Keywords: *coffee cultivation, irrigation depth, tensiometers, soil moisture content.*

3. Introducción

A nivel global se cultiva café en más de 70 naciones siendo notables: Brasil, Colombia, Indonesia, India y, más recientemente, Vietnam (ANECAFE, 2012). Según ANACAFÉ (2021) el café arábica es originario del sur de Etiopía y es la variedad más cultivada en el mundo, aporta alrededor del 60% de la producción mundial de café. Por otra parte, el café robusto aporta alrededor del 40% de producción a nivel mundial y produce un café de menor calidad en comparación al café arábica

Según COFENAC (2014) en Ecuador, se cultiva tanto café robusto como café arábigo. El café robusto se produce principalmente en las regiones amazónica y costa, mientras que el café arábigo se cultiva en altitudes más elevadas, generalmente entre 1.000 y 1.800 metros sobre el nivel del mar.

Con base a lo mencionado en el párrafo anterior, el cultivo del café se extiende a lo largo de 23 de las 24 provincias del país, lo que lo vincula estrechamente con una amplia estructura social. Donde, el café arábica, conocido también como café arábigo y renombrado por su excelente calidad, se produce principalmente en las provincias de Manabí, Loja y en las zonas cercanas a las estribaciones de la Cordillera Occidental de los Andes (Aspiazu Villavicencio et al., 2009); (Santistevan et al., 2016).

De esta manera, el café posee una importancia significativa en diversos aspectos: económicos, sociales, medioambientales. Desde una perspectiva económica, funciona como una fuente de ingresos para el país y para los productores, así como para los diversos participantes en la cadena de suministro. En términos sociales, la provincia de Loja es reconocida por su tradición cafetalera y posee implicaciones significativas para los productores y su comunidad sobre todo a nivel rural. En lo que concierne al aspecto ambiental, la producción de café se lleva a cabo principalmente dentro de sistemas agroforestales, contribuyendo a la preservación de los recursos naturales y la biodiversidad (PROECUADOR, 2016).

Por tanto en la provincia de Loja, los sistemas agroforestales que tienen como base al cultivo de café, han logrado sostenerse en las pequeñas y medianas unidades productivas, pero no se han conseguido niveles de rendimiento que se correspondan con la potencialidad de la especie y los recursos disponibles, lo que supone un manejo no adecuado de los sistemas agroforestales a los requerimientos hídricos del café (COFENAC, 2012), lo que amerita el

presente estudio con el fin de aportar con información integral que facilite la correcta utilización y gestión del agua de riego. Por ello, en el presente estudio, se examinó el rango de potencial matricial para mejorar la gestión adecuada del agua, basándose en el potencial matricial del suelo para el cultivo de café mediante riego por goteo en la Estación Experimental La Argelia. Para lo cual se planteó los siguientes objetivos.

Objetivo general

- Determinar la correlación entre la demanda atmosférica y contenido de humedad del suelo para establecer la lámina de riego a aplicar en el sistema agroforestal con café (*Coffea arabica* L.) en la Quinta Experimental “La Argelia”.

Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades hidro físicas del área de estudio.
- Determinar el factor de correlación entre la demanda atmosférica y el contenido de humedad del suelo mediante el uso de tanque evaporímetro tipo “A” y tensiómetros con el fin de establecer la lámina de riego óptima.

4. Marco teórico

4.1. Café

4.1.1. Descripción general

Condiciones agroecológicas

Requerimientos climáticos y edáficos, según (INIAP, 2014)

- Altitud: 500-1400 msnm
- Temperatura: 18 a 21°C
- Precipitación: 1300 -- 1800mm
- Humedad Relativa: 70 a 85%.
- Suelo: Franco arcilloso, franco arenoso o franco limoso.
- pH: 5,6 a 6,5

4.1.2. Requerimientos hídricos

Los requerimientos hídricos del cultivo se estiman a partir de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente del cultivo (kc) y varía de acuerdo a la etapa del cultivo. Según Bucio et al. (2012) sostienen que tanto el coeficiente de cultivo como la evapotranspiración son dos elementos esenciales para calcular los requerimientos hídricos de los cultivos.

La cantidad requerida en todo el ciclo para el cultivo de café es de 1600 a 1800 mm/año donde la etapa de floración y fructificación requiere mayor requerimiento hídrico para su desarrollo. En la etapa de floración está condicionada por condiciones climáticas como el fotoperíodo y la disponibilidad hídrica. Si existe pérdida del recurso agua o una distribución inadecuada, el café no cuenta con los requerimientos necesarios afectando los procesos fisiológicos de la planta por ende disminuyendo su rendimiento y producción (Cañón, 2018).

En la investigación realizada por Cortez y Tercero (2014) evaluaron la floración y producción de café bajo tres láminas de riego donde el mayor rendimiento se obtuvo con la lámina de 20 y 30 mm.

4.2. Recursos para la producción agrícola

Para comprender la importancia de los recursos en el desarrollo agrícola, es necesario considerar el tipo de explotación en cada región, como reflejan los estudios actuales de uso y manejo del suelo, resultado de factores ecológicos o naturales: suelo, clima, agua y

vegetación. La productividad agrícola es de vital importancia permite incrementar la cantidad de alimentos y mejorar la eficiencia productiva lo que repercute en el crecimiento del mercado agrícola, el empleo y los ingresos de numerosas familias. El aumento de la productividad agrícola implica una distribución más eficiente de los recursos disponibles (Herreros y Espinoza, 2011).

Para lograr alta producción de cultivos, el agricultor debe ser capaz de administrar eficientemente los recursos: tierra, capital y trabajo. Esto implica tener un entendimiento de los factores de producción que pueden ser modificados o controlados a corto plazo desde una perspectiva económica; así como tener un conocimiento razonable sobre la distribución de los factores incontrolables tanto física como económicamente en sus tierras (Bejarano, 2017). Dentro de la diversidad de explotaciones agrícolas que han existido tanto en el pasado como en la actualidad, es posible encontrar relaciones que se establecen entre los elementos que participan en cualquier proceso de producción y que determinan su desarrollo (Parra et al., 2019).

4.3. Recurso suelo

El suelo desempeña un papel fundamental como recurso vital para la sustentación de la vida en nuestro planeta. Proporciona nutrientes, agua y minerales necesarios para el crecimiento y desarrollo de plantas y árboles. Además, actúa como un almacén de carbono y alberga una amplia variedad de especies animales (FAO, 2009; Porta et al., 2015). Además, el suelo también es el soporte natural para la producción de alimentos y materias primas, los cuales son fundamentales para el funcionamiento de la sociedad y las actividades socioeconómicas. Es importante destacar que, debido a que su formación requiere de largos períodos de tiempo, se considera un recurso limitado y no renovable (Bautista et al., 2004).

Según FAO (2023) las actividades agrícolas tienen un efecto significativo en los organismos y la diversidad de vida presentes en el suelo. Casi la totalidad, alrededor del 99%, de los alimentos que se consumen en todo el mundo provienen de la producción agrícola que se lleva a cabo en tierras agrícolas, las cuales abarcan aproximadamente entre el 50% y el 70% del área terrestre a nivel global

Existe una relación mutua entre los suelos y la vegetación, ya que el nivel de nutrientes presentes en una planta se vincula estrechamente con la cantidad de nutrientes del suelo, así como con su habilidad para intercambiar nutrientes y agua a través de las raíces de la planta.

Además, el desarrollo de la planta se ve influenciado por las características físicas del suelo, tales como su textura, estructura y permeabilidad. Tener un entendimiento completo de las características del suelo es un punto de partida esencial para mejorar su manejo (Vega et al., 2023)

4.3.1. *Propiedades químicas*

Según los autores Bautista et al. (2004); Monge (2016) las propiedades químicas del suelo están directamente relacionadas con la calidad y disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas. Algunas propiedades químicas relevantes incluyen el pH, la materia orgánica, la conductividad eléctrica y los nutrientes extractables como fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K)

4.3.1.1. pH

La medición del pH se relaciona con la cantidad de iones hidrógeno activos (H^+) presentes en la interfaz líquida del suelo, debido a la interacción entre los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno desempeña un papel fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el suelo (Fernández y Rojas, 2006).

Según Padilla (2007) cuando las plantas crecen en suelos ácidos o alcalinos, algunos nutrientes se vuelven altamente insolubles a pH elevados, mientras que otros se vuelven menos disponibles a pH bajos. La disponibilidad máxima de la mayoría de nutrientes ocurre en un rango de pH que va de 6,5 a 7,5.

4.3.1.2. Capacidad de intercambio catiónico

Los cationes que desempeñan un papel fundamental en los procesos de intercambio catiónico en el suelo, debido a su cantidad y participación en dichos procesos, incluyen el Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ (conocidos como bases del suelo), así como el NH_4^+ en suelos ácidos. Sin embargo, a partir de ciertos valores de pH, el Al^{3+} adquiere una gran relevancia en el complejo de intercambio catiónico del suelo, junto con el H^+ , y contribuye a la acidez intercambiable del suelo (Jaramillo, 2002).

4.3.1.3. Materia orgánica

Clunes y Pinochet (2014) mencionan que la presencia de materia orgánica en el suelo es influenciada tanto por factores bióticos, como la abundancia, producción y diversidad de

especies vegetales, así como la actividad microbiana, como por factores ambientales, tales como la temperatura, contenido de agua y textura del suelo. La dinámica y conservación de la MOS son de vital importancia, ya que mejoran la estructura y porosidad del suelo, su fertilidad y, en última instancia, la producción de Propiedades hidro físicas del suelo.

Por otro lado, las características físicas del suelo reflejan cómo se almacena y suministra agua a las plantas, así como su capacidad para permitir el desarrollo de las raíces. Estas características físicas incluyen la estructura, la densidad aparente, la estabilidad de los agregados, la infiltración, la profundidad, la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento (Bautista et al., 2004).

4.3.2. *Propiedades físicas del suelo*

4.3.2.1. Textura

Es la distribución de las partículas del suelo. expresada en porcentaje. Estas partículas son: la arena (2 - 0.02 mm). el limo (0.02 - 0.002 mm) y la arcilla (0.002). Esta característica tiene relación con la aireación, movimiento del agua, retención de humedad, disponibilidad de nutrientes y la producción tanto agrícola e intercambio de biomasa (Lachimba, 2014, p. 28).

4.3.2.2. Estructura

Lachimba (2014) denomina que la estructura es la forma en la que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla, su formación se debe a cargas eléctricas en la superficie de las arcillas. Cuando estas partículas individuales se agrupan se denominan agregados, puede variar debido a que las partículas que están presentes dentro de los agregados son muy débiles.

Según Calvache (2009) se determinó que realizar actividades agrícolas en exceso, especialmente en condiciones húmedas, tiene como consecuencia una disminución en la cantidad de materia orgánica presente en el suelo. Además, factores como el impacto de las gotas de lluvia, la compactación causada por maquinaria y el pastoreo también contribuyen al deterioro de la estructura del suelo. Estos procesos conducen a una reducción en la aireación del suelo y dificultan la infiltración y percolación del agua en el mismo (p. 20).

4.3.2.3. Porosidad

Rucks et al. (2004) expone que en el espacio poroso se pueden distinguir los macroporos que no retienen el agua con la fuerza de la gravedad, son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, a diferencia de los microporos que retienen el agua, parte de la cual está disponible para las plantas. Está condicionada por su textura y estructura.

Según Hudson (1997) definió una clasificación de cinco categorías para describir la porosidad en los suelos. Esta clasificación se basaba en los poros cuyo tamaño era inferior a 60 micrómetros, y se determinaba el porcentaje del volumen total del suelo que ocupaban dichos poros.

Tabla 1. Clasificación de la porosidad.

% ocupado por poros	Clase
<5,0	Muy débilmente poroso
5,0 – 9,9	Débilmente poroso
10,0- 14,9	Moderadamente poroso
15,0 – 20,0	Muy poroso
<20,0	Extremadamente poroso

Fuente: Disponible en Hudson (1997).

4.3.2.4. Densidad Aparente

La densidad aparente es el volumen ocupado por los poros, es decir, la densidad del suelo tal como es, la densidad aparente de los horizontes A en suelos minerales generalmente oscila entre 1,0 y 1,6 g/cm³. En cambio, en suelos orgánicos la densidad aparente es más baja y puede llegar a ser de 0,1 g/cm³. La principal causa de estas variaciones radica en las diferencias en el volumen total de poros. En términos generales, los suelos con textura fina presentan una mayor porosidad y una menor densidad aparente en comparación con los suelos arenosos (Thompson y Troeh, 2002).

Mientras que Yagüe (2003) menciona que la densidad real en cambio es la densidad de las partículas sólidas y equivale al peso del suelo seco dividido entre el volumen ocupado por las partículas sólidas.

4.3.2.5. Profundidad de las raíces

La profundidad del sistema radícula depende de cada especie y está condicionada por factores, tales como: características genéticas del cultivo, características del suelo, presencia de capas impermeables, nivel del agua en el suelo, oxígeno, etc. El agua se agota con mayor

rapidez en las capas superficiales por ello conviene reponer el agua y considerar no solo la profundidad total sino también la profundidad efectiva, que corresponde, aproximadamente a un 80% de su profundidad total (Yagüe, 2003).

De acuerdo con la clasificación de la FAO (1976a), citada por Chavarría (2007) menciona que la profundidad efectiva del suelo puede trabajarse con máquinas o de forma manual, se divide en cuatro categorías y estas categorías son las siguientes:

Tabla 2. *Clasificación de profundidad de suelos.*

Profundidad	Clasificación
< 20 cm	Muy someros
20-50 cm	Someros
50-90 cm	Moderadamente profundos
> 90 cm	Profundos

Fuente: Disponible en Chavarría (2007).

4.3.2.6. Infiltración

La infiltración se refiere al proceso en el cual el agua penetra en el suelo, mientras que la tasa o velocidad de infiltración se refiere a la rapidez con la que ocurre este proceso. Según Alocén (2007) la tasa de infiltración está influenciada principalmente por los siguientes factores:

- **Contenido de humedad del suelo:** El agua se infiltra más rápidamente (con una tasa de infiltración más alta) cuando el suelo está más seco. Al regar un suelo seco, el agua se infiltrará rápidamente al principio, pero a medida que el suelo se humedece, la tasa de infiltración disminuye (p. 60).
- **Textura del suelo:** Los suelos de textura gruesa, como los arenosos, tienen poros de mayor tamaño en comparación con los suelos de textura fina, como los arcillosos. Esto facilita el movimiento del agua a través de ellos, lo que resulta en una mayor tasa de infiltración (p. 60).
- **Estructura del suelo:** En general, los suelos bien estructurados permiten una infiltración más rápida que los suelos compactados. El manejo del suelo, especialmente a través de prácticas de laboreo, juega un papel fundamental en la formación de la estructura del suelo y, por lo tanto, en la infiltración (p. 61).

4.3.3. Relación suelo-agua

Calvache (2010) expresa que los fenómenos de difusión son los esenciales en las relaciones entre el agua y la planta porque, permite la distribución uniforme de las moléculas debido a la energía cinética. Además, el potencial matricial y osmótico influyen en la absorción de agua para las plantas.

Según Calvache (1997) cuando disminuye el agua disponible en el suelo, las plantas tienen que trabajar más para extraer agua, lo que se traduce en un menor consumo de agua. Si el suelo se seca hasta el punto de que el uso del agua se restringe severamente, las plantas crecerán más lentamente y producirán menos. Por esta razón, la cantidad de agua en los depósitos del suelo debe mantenerse a un nivel adecuado por encima del PMP (p. 8).

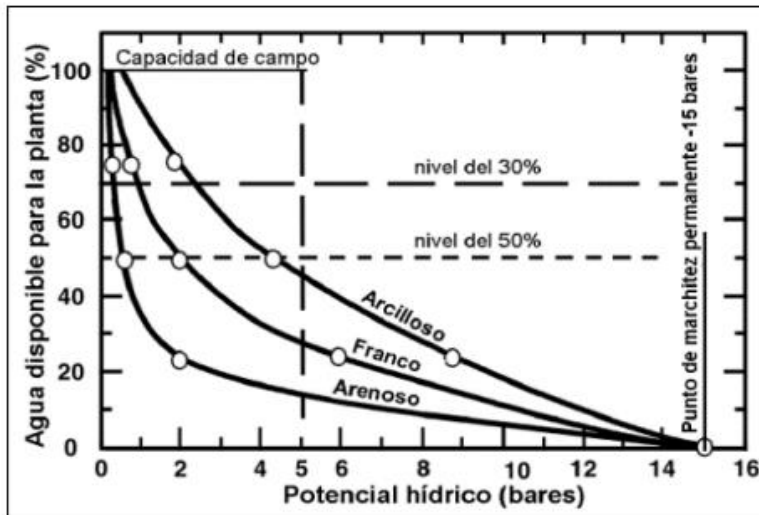
4.3.3.1. Potencial del agua

El movimiento del agua en el suelo está gobernado por energía potencial y cinética; la energía cinética depende de la velocidad a la que se mueve el agua entre dos puntos del perfil, es entonces la energía potencial la que determina el estado energético y el movimiento del agua en el suelo. Viene determinado por la presión a la que está sometida y gravedad (Yagüe, 2003).

4.3.3.2. Retención del agua por el suelo

Según Yagüe (2003) la curva de retención de humedad indica la relación entre el contenido de humedad y la tensión matricial del agua presente en el suelo, y depende de la textura, porosidad y estructura. Por ejemplo, en una misma tensión, el suelo retiene más agua cuando la textura es más fina.

Figura 1. Diagrama con curvas características del contenido de humedad y tensión para suelos arenosos, arcillosos y francos.



Fuente: Disponible en Edward (2010).

De acuerdo con Carpena y Ritter (2005) la curva de retención de humedad presenta diversos usos como:

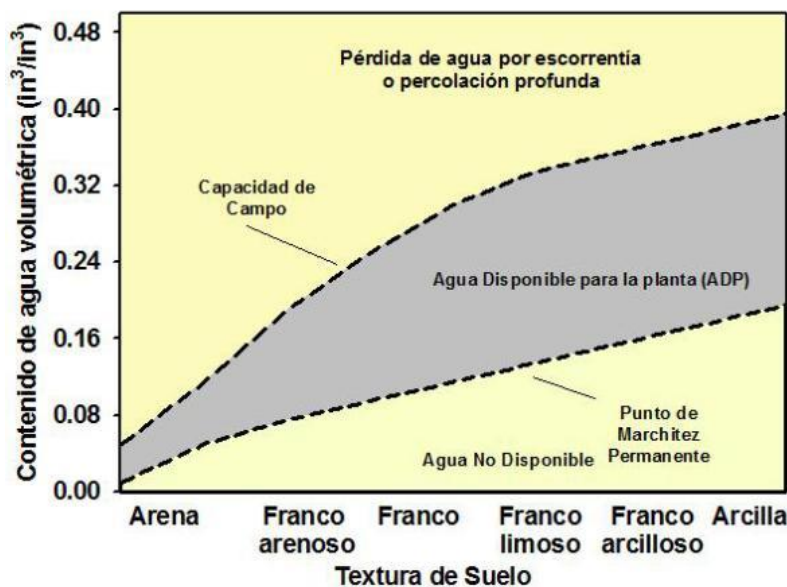
- Determinar la disponibilidad de humedad en el suelo, es decir, la cantidad de agua que las raíces de las plantas pueden absorber fácilmente. Además, se utilizan para clasificar los diferentes tipos de suelos.
- Determinar el espacio poroso drenable, esto permite identificar la cantidad de espacio en el suelo que puede drenar el agua de manera eficiente.
- Verificar los cambios en la estructura del suelo que pueden ser ocasionados por actividades como la labranza o la mezcla de capas de suelo.
- Establecer la relación entre la tensión de humedad del suelo y ciertas propiedades físicas, como la conductividad capilar, la conductividad térmica, así como el contenido de arcilla y materia orgánica en el suelo.

4.3.3.3. Niveles de humedad del suelo

Los suelos presentan variaciones en la cantidad de agua que contienen, las cuales dependen de su textura y estructura. El límite máximo de retención de agua se conoce como "capacidad de campo" (CC), mientras que el límite mínimo se denomina "punto de

marchitamiento permanente" (PMP). Después de eventos de lluvia o riego que saturan el suelo, una parte del agua se mueve rápidamente hacia abajo (drenaje) debido a la gravedad. Durante este proceso, la humedad del suelo disminuye de manera constante. La velocidad de drenaje está relacionada con la conductividad hidráulica del suelo (Zotarelli et al., 2019).

Figura 2. Relación general entre el agua disponible para la planta (ADP), la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, el agua no disponible y la clase de textura del suelo.



Fuente: Disponible en Zotarelli et al. (2019).

A continuación, se describen los estados presentes del agua en el suelo:

- **Saturación**

Cuando el suelo se humedece como resultado de la lluvia, el riego por gravedad o el riego por aspersión, el agua penetra en el suelo y se desplaza hacia abajo debido a la fuerza de la gravedad. En estas circunstancias, el suelo se satura, lo que significa que la mayoría de los poros se llenan de agua (Sapir y Sneh, 2002).

- **Capacidad de campo**

Hurtado (2002) manifiesta que CC es la máxima cantidad de agua retenida por un suelo con buen drenaje, los poros pequeños (micro poros) retienen el agua contra la fuerza de gravedad, pero con una energía que es fácilmente superada por la fuerza de succión de las

raíces. Hidalgo (2008) “la capacidad de campo se alcanza cuando la tensión del agua en el suelo es de aproximadamente 0.3 bares (30 centibares o 3 m de columna de agua) en suelos arcillosos o de 0.1 bares en suelos de textura media” (p. 15).

- **Punto de marchitez**

Es el contenido de humedad del suelo al cual las plantas no logran extraer agua para compensar sus necesidades de transpiración, manifestándose síntomas de marchitamiento, caída de hojas. Este punto se logra cuando la tensión del agua en el suelo alcanza entre 10 y 20 bares (Enciso et al., 2007).

Según Fuente (2006) manifiesta que agua útil es la cantidad de agua comprendida entre los valores de capacidad de campo (0.33 bares) y punto de marchitez permanente (15 bares) y comprende la humedad del suelo que puede ser utilizada por los cultivos.

Tabla 3. *Contenido de agua en CC y PMP en distintas clases texturales.*

Clase textural	CC (%)	PMP (%)
Arcilla	23 – 46	13 - 29
Franco arcillosa	18 – 23	9 – 10
Franca	12 – 18	4 – 11
Franco arenosa	8 – 13	4 – 6
Arena	5 – 7	1 – 3

Fuente: Disponible en Silva et al. (2015).

- **Agua útil**

A la dosis comprendida de agua entre los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente se le denomina agua útil y comprende la humedad del suelo que puede ser utilizada para los cultivos y mejorar la calidad del suelo donde se está preparando para las siembras (Fuente, 2006).

Según Morú (2005) el agua útil puede estar entre el 66 % (de la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente) para cultivos que son pocos sensibles al estrés hídrico y 25% para cultivos muy sensibles.

4.3.3.4. Factores que condicionan la capacidad de retención del agua disponible

La capacidad de retención de agua disponible es una característica de vital importancia en el suelo agrícola, tanto para los cultivos que dependen de la lluvia (cultivos de secano)

como para aquellos que se riegan (cultivos de regadío). En los cultivos de secano, esta capacidad determina la duración del período de sequía que las plantas pueden tolerar, mientras que en los cultivos de regadío influye en la cantidad y frecuencia de los riegos necesarios (Yagüe, 2003).

De acuerdo con Vega (2011) existen diversos factores que ejercen influencia en la capacidad de agua disponible en el suelo, estos elementos condicionan la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener y poner a disposición de las plantas.

- **Textura:** Los suelos de textura fina retienen más agua en comparación con los suelos de textura gruesa, esto se debe a que los suelos arenosos tienen una mayor proporción de poros grandes, los cuales están ocupados principalmente por aire en lugar de agua.
- **Estructura:** Los suelos con una estructura bien desarrollada tienden a retener más agua, especialmente cerca de la capacidad de campo. Por otro lado, los suelos compactados pueden contener una mayor cantidad de agua disponible en valores cercanos al punto de marchitamiento debido a que la compactación provoca cambios en el tamaño de los poros. Esto permite que se retenga más agua en dichos suelos apelmazados.
- **Materia orgánica:** la MO presenta una alta porosidad, lo que le permite retener una cantidad significativa de agua. Su influencia en la capacidad de retención de agua es más pronunciada en suelos arenosos que en suelos arcillosos. En los suelos arcillosos, las partículas de materia orgánica se encuentran estrechamente unidas a las partículas finas de arcilla, lo que permite que una misma película de agua las envuelva.
- **Espesor del suelo explorado por las raíces:** Un suelo de mayor profundidad tiene la capacidad de retener una gran parte de las necesidades de agua de los cultivos. En contraste, en suelos poco profundos, se necesitarán aportes significativos de agua debido a su capacidad limitada de retención de agua.
- **Capas en el perfil:** Cuando una capa de arcilla se encuentra debajo de una capa de arena, se retrasa la penetración del agua de infiltración, lo que resulta en una acumulación de agua sobre la capa menos permeable durante un período de

tiempo prolongado. En algunos casos, este retraso en la infiltración permite que las plantas absorban cantidades importantes de agua, especialmente cuando la acumulación coincide con períodos críticos en los que las plantas tienen una mayor demanda hídrica ((Yagüe, 2003); (Caicedo et al., 2021)).

4.3.3.5. Medición de humedad

Existen diversos métodos para el cálculo, pero los más utilizados son: gravimétrico, sonda de neutrones, bloques de yeso, tensiómetros, visual y de tacto.

- **Tensiómetro:** Es un dispositivo utilizado para medir el potencial matricial del suelo, que representa la fuerza ejercida por las raíces de las plantas para extraer agua del suelo. Consiste en una capa porosa de cerámica que está conectada a un tubo hueco transparente que contiene una columna de agua (Figura 3). La presión se registra mediante un manómetro de vacío ((Smajstrla y Harrison, 2011);(Guy, 2014)). Hodnett (2010) recomendó que los tensiómetros se colocaran a lo largo la línea de goteo, por debajo de la zona de raíz, pero dentro de la zona húmeda.

Figura 3. Diagrama de un tensiómetro y de una estación de dos tensiómetros instalados a diferentes profundidades del suelo.



Fuente: Disponible en Durner (2006).

○ **Funcionamiento:**

Según Grasso et al. (2022) “la cápsula de cerámica desempeña un papel fundamental al facilitar el equilibrio de fluidos entre el tensiómetro y el suelo. A medida que el suelo se va secando, la presión del agua dentro del tensiómetro aumenta y se aleja del valor de 0 en el manómetro. Por otro lado, cuando el suelo se encuentra más húmedo, la tensión disminuye y la lectura del manómetro tiende a acercarse a 0” (p. 79).

Niño et al. (2014) indica los rangos de tensión matricial entre 0 y 10 cb indican suelo saturado; entre 10 y 20 cb, capacidad de campo; desde 30 a 60 cb, inicio del riego; y tensiones mayores a 70 cb reflejan la poca disponibilidad de agua para las plantas.

Tabla 4. Rangos de tensión en el agua del suelo y su interpretación.

Tensión (cb)	Interpretación
0 – 5	El suelo demasiado húmedo para la mayoría de cultivos
10 – 25	Contenido de agua y aireación ideales para la totalidad de cultivos, riego no requerido
25 – 40	Contenido de agua adecuado para muchos cultivos, excepto para los de raíces someras, y/o suelos arenosos, riego depende de la condición del suelo y planta
40 – 50	Agua adecuada para los cultivos con sistemas radiculares medianamente profundos en suelos de textura media
50 – 70	Agua adecuada para cultivos con raíces profundas
70 – 80	Riego recomendado para la mayoría de cultivos en cualquier tipo de suelo
> 80	El riego es necesario, excepto si se requiere de estrés al cultivo.

Fuente: Disponible en Cadena (2016).

4.4. Recurso agua

A escala global, la agricultura es el sector que más agua consume, con informes que indican consistentemente que utiliza alrededor del 70% del total de agua utilizada en el planeta cada año. Esto se debe a dos factores principales: en primer lugar, la alta demanda de agua por unidad de producción de los productos agrícolas, en segundo lugar, a las eficiencias generales del riego (FAO, 2018).

Caicedo et al. (2021) la cantidad de agua disponible en el suelo es un factor crucial que influye en la fertilidad del suelo y tiene un impacto directo en el desarrollo de los cultivos. Además de ser vital para los procesos biológicos del suelo, también desempeña un papel en la regulación de la temperatura del suelo. En la actualidad, se busca activamente monitorear la

cantidad de agua disponible en el suelo con el fin de optimizar su uso y mantener un control adecuado sobre las propiedades del suelo.

4.4.1. Calidad del agua de riego

Según Moratiel (2017) “El agua es el principal recurso que las plantas obtienen del suelo como fuente de alimentación. Por esta razón, los agricultores siempre han buscado proporcionarla en la cantidad y frecuencia que consideren óptimas” (p. 27).

Escalante (2008) menciona que, “cuando se trata del riego, además de buscar la eficiencia en el uso del agua debido a su escasez, es importante garantizar su calidad para que sea adecuada para el riego. Esto es especialmente relevante en el caso del riego localizado por goteo, donde las oportunidades de lavado de sales son limitadas” (p. 74).

La calidad del agua para el riego está determinada por varios factores, como:

- Calidad: se refiere a las características físicas y químicas del agua.
- Tipo y condiciones del suelo.
- Tipo de cultivo.
- Manejo del riego.

A través de la consideración y gestión de estos factores, se asegura que el agua utilizada para el riego cumpla con los requisitos necesarios (Vega, 2019).

4.4.2. Lámina de riego

Según Gavilánez y Farias (2019) es la cantidad de agua necesaria para aplicar en el suelo y satisfacer las demandas del cultivo y depende del almacenamiento adecuado de agua, así como de la profundidad de las raíces. Se expresan en mm o cm. Para determinar la lámina de agua requerida, se considera el volumen acumulado de agua en el suelo, determinado por la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP).

4.4.3. Lámina bruta (Lb)

Además de satisfacer las necesidades netas de agua de las plantas, el suministro de agua para el cultivo debe considerar todas las pérdidas de agua debido a factores como la escorrentía, la evaporación, el arrastre del viento, entre otros (Rondon, 2016).

La cantidad total de agua requerida se denomina lámina bruta, la cual se calcula a partir de la lámina neta ajustada por la eficiencia de riego, como se explica en la siguiente fórmula propuesta por (Castro, 2009):

$$Lb = \frac{Ln}{Ea}$$

Donde:

Lb lamina bruta (mm)

Ln lamina neta (mm)

Ea eficiencia de aplicación (%)

4.4.4. Lámina neta (*Ln*)

Se refiere a la cantidad de agua que se debe reponer al suelo en cada riego para satisfacer las necesidades de agua del cultivo que han sido utilizadas durante la evapotranspiración. Esta lámina neta se calcula a partir del volumen acumulado entre el contenido de humedad en capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Rivera y Rivera, 2021).

Para calcular la lámina neta de aplicación de agua, se requiere conocer los siguientes datos:

- La humedad disponible del suelo, que se obtiene restando el punto de marchitez permanente (PMP) de la capacidad de campo (CC).
- El agotamiento de la humedad disponible del suelo
- La profundidad radical efectiva del cultivo.

Considerando la frecuencia de riego, que se refiere al intervalo de tiempo entre dos riegos consecutivos, es decir, el tiempo que el cultivo tarda en consumir el agua del suelo a través de la evapotranspiración, es posible determinar el valor de la lámina neta. Esta relación puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

Fr frecuencia de riego

Ln lámina neta

ETc evapotranspiración del cultivo

Si la frecuencia de riego es igual a 1 día, la lámina neta será igual a la evapotranspiración del cultivo y se puede expresar la ecuación de la lámina bruta de la siguiente forma:

$$Lb = \frac{ETc}{Ea}$$

4.4.5. Intervalo de riego

Las necesidades de agua de la mayoría de los cultivos varían según su estado de desarrollo. A medida que las raíces crecen, el área foliar se incrementa y aparecen diferentes estructuras, los requisitos de agua también experimentan cambios (Moratíel, 2017).

La capacidad máxima de retención de agua del suelo varía en función de su textura, contenido de materia orgánica, profundidad de enraizamiento y estructura. La eficiencia del riego por aspersión suele ser del 80-85% en términos de porcentaje (Calvache, 2013).

4.5. Necesidades hídricas de los cultivos

Los requerimientos hídricos de los cultivos dependen principalmente de la especie, variedad, etapa fenológica, fecha de siembra y condiciones ambientales del ciclo fenológico. La necesidad de agua de los cultivos es la cantidad de agua que se requiere para satisfacer la tasa de evapotranspiración, de modo que los cultivos puedan prosperar (Guy, 2014)

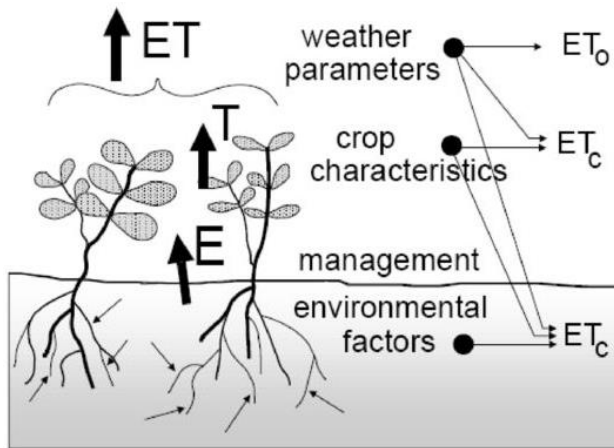
4.5.1. Evapotranspiración

Según López (2007) denomina como “uso consuntivo” y combina dos términos: transpiración y evaporación de la superficie del suelo y la vegetación, cuando la evapotranspiración sobrepasa la precipitación el contenido de agua desciende.

4.5.1.1. Factores que influyen en la evapotranspiración

Según FAO (2006) indica que el clima, características del cultivo, manejo y el modo de desarrollo afectan la evapotranspiración

Figura 4. Factores que afectan la evapotranspiración.



Fuente: Disponible en Allen et al. (2006)

- **Variables climáticas:** temperatura, radiación, humedad y velocidad del viento
- **Factores del cultivo:** la evapotranspiración varía a lo largo del ciclo vegetativo, del tipo de cultivo, etapa de desarrollo.
- **Condiciones ambientales:** favorecen o atenúan la evaporación son: cubierta del suelo, densidad del cultivo, contenido de agua, baja fertilidad, salinidad, uso de fertilizantes, ausencia del control de malezas y enfermedades (Allen et al., 2006).

4.5.2. Evapotranspiración del cultivo

Cuando la evapotranspiración se produce sin ninguna restricción de agua en el suelo se conoce como evapotranspiración del cultivo (ET_c) y corresponde a la cantidad de agua que debe ser aportada al suelo estacionalmente mediante lluvia y/o riego (León, 2018).

Según León (2018) la evapotranspiración del cultivo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ET_c = ETo * k_c$$

Donde:

ET_c evapotranspiración del cultivo en mm/día

ETo evapotranspiración de referencia en mm/día

K_c coeficiente de cultivo (a dimensional)

4.5.3. *Evapotranspiración de referencia*

Indica la cantidad de agua que se evapora a la atmosfera de una cobertura vegetal de referencia, bajo condiciones óptimas de crecimiento y bajo un suministro adecuado de agua. Existen diversos métodos directos e indirectos para determinar la ETo que consisten en ecuaciones empíricas con base a las variables climáticas (Pérez, 2006).

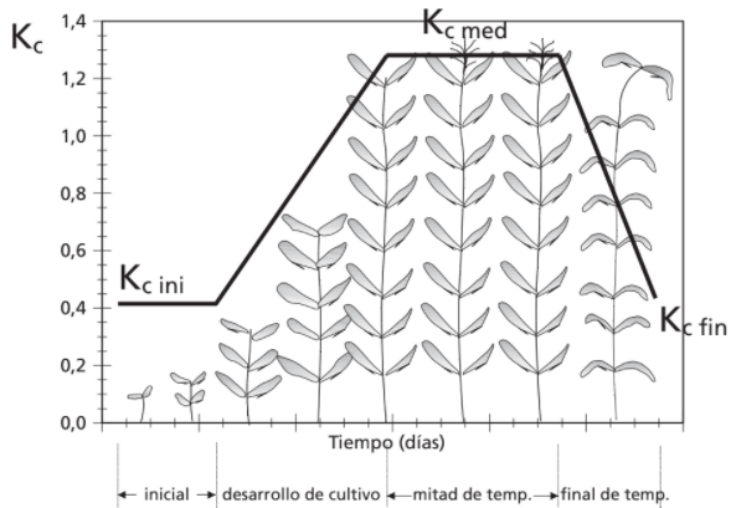
4.5.4. *Coficiente del cultivo*

El coeficiente de cultivo (*K_c*) es un parámetro crucial para la gestión del riego porque combina en un solo valor la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas en relación con la evapotranspiración del cultivo de referencia, lo que la convierte en una excelente herramienta para la planificación y gestión del riego. Los valores del *K_c* varían en cada etapa fisiológica del cultivo (FAO, 2006).

El coeficiente de cultivo (*K_c*) es el resultado de la relación entre la evapotranspiración de un cultivo (*ET_c*), durante una etapa definida, con la evapotranspiración del cultivo de referencia (*ETo*), su fórmula es la siguiente:

$$K_c = ET_c / Eto$$

Figura 5. Curva generalizada del coeficiente del cultivo.



Fuente: Disponible en FAO (2006)

4.5.5. Precipitación efectiva

Se refiere a la porción de la precipitación total que es utilizada por las plantas. Su cantidad depende de diversos factores, como la intensidad de la precipitación y aridez del clima. También está influenciada por otros factores, como la pendiente del terreno, el contenido de humedad del suelo y la velocidad de infiltración (Carrillo, 2014).

4.5.6. Necesidades de riego de los cultivos

De acuerdo con la FAO (2006), las necesidades de agua de riego se determinan al restar las necesidades de agua del cultivo a la porción de lluvia que es utilizada por las plantas, conocida como precipitación efectiva. El cálculo de las necesidades de agua de riego es fundamental para establecer el calendario de riegos y diseñar el sistema de riego correspondiente.

$$NH = Etp * Kc$$

Donde:

NH necesidades hídricas (mm/mes)

Etp evapotranspiración potencial o del cultivo de referencia (mm/mes)

Kc coeficiente de cultivo

4.5.7. Métodos para determinar la evapotranspiración

Para estimar la ETo existen diversos métodos directos e indirectos, los primeros proporcionan directamente el consumo de agua requerida con aparatos e instrumentos, mientras los segundos se obtiene mediante fórmulas empíricas

4.5.7.1. Tanque evaporímetro tipo A

La evapotranspiración potencial del cultivo (Eto) se puede medir empleando el tanque de evapotranspiración clase “A” en el que se anotan periódicamente las diferencias de nivel de agua, proporciona un indicador del impacto combinado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y el viento en la evapotranspiración. La tasa evaporativa de los tanques de evaporación llenos de agua puede ser fácilmente obtenida. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada durante un período (mm/día) corresponde a la disminución de la altura de agua en el tanque en ese período (FAO, 2006).

Figura 6. Características del tanque evaporímetro tipo A.



Fuente: Disponible en Allen et al. (2006)

FAO (2006), expresa que la evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque, así:

$$ET_o = K_p * Evap$$

Donde:

ET_o evapotranspiración de referencia (mm/día)

K_p coeficiente del tanque evaporímetro (adimensional)

Evap evaporación del tanque evaporímetro (mm/día)

La cobertura del suelo alrededor del tanque, así como el viento y las condiciones generales de humedad, afectan el coeficiente del tanque.

Por lo tanto, la ubicación y el entorno del tanque tienen un impacto en los resultados. Si hay algún ajuste específico a la instalación del tanque, como una posible decoloración del tanque, oxidación del centro del protector del tanque o cualquier otra ocurrencia, el K_p debe verse afectado de acuerdo con las variaciones inherentes al tanque (Allen et al., 2006)

Figura 7. Coeficientes del tanque evaporímetro (K_p) para el tanque Clase A para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa.

Tanque Clase A	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada			Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo					
	HR media	baja < 40	media 40-70	alta > 70	baja < 40	media 40-70	alta > 70		
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Distancia del cultivo a barlovento (m)				Distancia del barbecho a barlovento (m)				
Baja	1	,55	,65	,75	1	,7	,8	,85	
	< 2	10	,65	,75	,85	10	,6	,7	,8
	100	,7	,8	,85	100	,55	,65	,75	
Moderada	1000	,75	,85	,85	1000	,5	,6	,7	
	1	,5	,6	,65	1	,65	,75	,8	
	2-5	10	,6	,7	,75	10	,55	,65	,7
Alta	100	,65	,75	,8	100	,5	,6	,65	
	1000	,7	,8	,8	1000	,45	,55	,6	
	1	,45	,5	,6	1	,6	,65	,7	
> 8	10	,55	,6	,65	10	,5	,55	,65	
	100	,6	,65	,7	100	,45	,5	,6	
	1000	,65	,7	,75	1000	,4	,45	,55	
Muy alta	1	,4	,45	,5	1	,5	,6	,65	
	> 8	10	,45	,55	,6	10	,45	,5	,55
	100	,5	,6	,65	100	,4	,45	,5	
	1000	,55	,6	,65	1000	,35	,4	,45	

Fuente: Disponible en FAO (2006)

4.5.7.2. Métodos indirectos

Según Vásquez et al. (2017) las fórmulas empíricas están consideradas como métodos indirectos y consisten en fórmulas o ecuaciones deducidas por diversos investigadores.

El método de Thornthwaite calcula la evapotranspiración potencial mediante los datos existentes de las temperaturas medias mensuales, el de Turc utiliza la precipitación y temperatura medias de una cuenca, y los de Blaney y Criddle y Grassi y Christensen hacen uso de la radiación solar (Rodríguez, 2014).

4.6. Modelo de regresión

4.6.1. Análisis de correlación

Para examinar la relación entre contenido de humedad y la demanda atmosférica, es necesario realizar un análisis estadístico de su correlación. La correlación se define como el grado de variación conjunta que existe entre dos o más variables. Para lograr esto, se emplearon diferentes leyes de regresión para estimar el valor de una variable aleatoria, conocida como "Variable dependiente", en función del valor de otra variable conocida como "Variable independiente". La ecuación de regresión se refiere a la fórmula algebraica que permite determinar el valor de la variable independiente (Macas, 2019).

4.6.2. Ajuste del modelo de regresión lineal

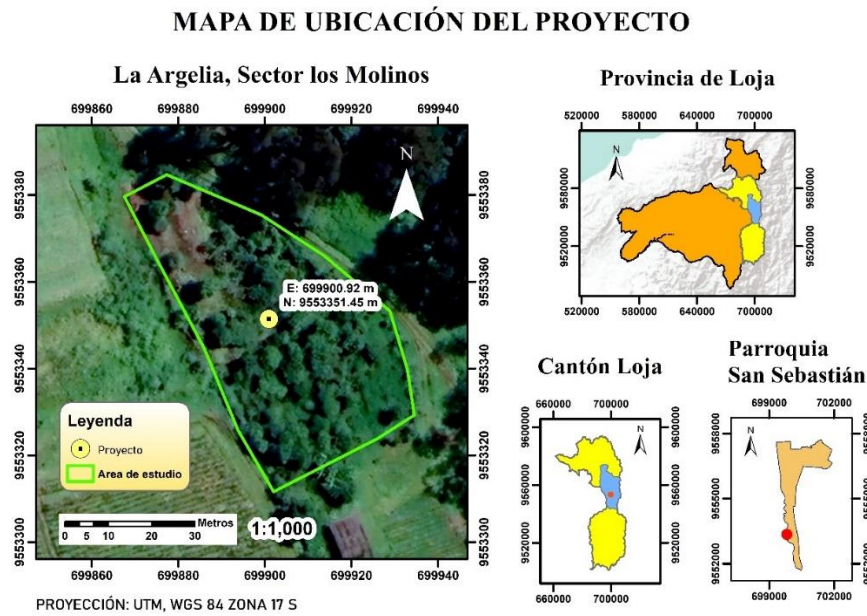
Antes de utilizar el modelo de regresión lineal simple para predecir los valores de una variable criterio, es fundamental asegurarse de que los datos que se van a analizar se ajustan al modelo de regresión lineal simple. Es decir, es necesario analizar el grado de asociación lineal entre la variable dependiente y la independiente y determinar la proporción de variabilidad de la variable dependiente que se explica a través de la independiente (Rodríguez y Mora, 2001).

5. Metodología

5.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio es la Quinta Experimental "La Argelia" de la Universidad Nacional de Loja, sector Los Molinos, ubicada en el cantón y provincia de Loja.

Figura 8. Mapa de ubicación del proyecto.



Características agroclimáticas

De acuerdo con los datos registrados en la Estación del instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), para un periodo de 46 años (1970-2015), las condiciones climáticas medias se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones climáticas medias anuales en la Quinta Experimental “La Argelia”.

CONDICIONES CLIMÁTICAS	
Precipitación anual	906.9 mm
Temperatura mínima	3 °C
Temperatura máxima	27.8°C
Temperatura media	15.5 °C
Humedad relativa media	74%
Humedad relativa máxima	78%

Humedad relativa mínima 72%

Velocidad del viento
3.1 m/s

Fuente: (INAMHI, 2015).

5.2. Diseño de la investigación

Dado que el objetivo del estudio será obtener la lámina de riego entre las variables del suelo y clima, se recurrió a realizar una investigación de tipo descriptivo para conocer a detalle por un modelo de regresión lineal y realizar un ajuste del mismo.

De acuerdo con Guevara (2020) la investigación descriptiva “El objetivo de la investigación descriptiva consiste en llegar a conocer las situaciones, costumbres y actitudes predominantes a través de la descripción exacta de las actividades, objetos, procesos y personas” (p.171). Su meta no se limita a la recolección de datos, sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables.

5.3. Enfoque de investigación

El presente trabajo será diseñado bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, puesto que este es el que mejor se adapta a las características y necesidades de la investigación.

5.4. Materiales y equipos

Herramientas de labranza, manuales, libreta de campo, cinta métrica, GPS, bolsas plásticas, calculadora, tensiómetro, tanque evaporímetro tipo “A”, bomba de succión del tensiómetro, pluviómetro, anillos kopecky, barreno.

5.5. Metodología para el primer objetivo

Caracterizar las propiedades hidro físicas del área de estudio

5.5.1. Descripción del perfil del suelo

Se realizaron las siguientes actividades:

Reconocimiento del terreno, toma de muestras de suelo para hacer el respectivo análisis en el laboratorio del INIAP.

El procedimiento metodológico para caracterizar el suelo en el área de estudio se realizó de la siguiente manera:

- Definir los puntos de muestreo (calicatas).
- Para la descripción de las calicatas se utilizó la Guía de Descripción de perfiles de suelos del USDA (2014).
- Visualmente en el suelo, se determinará: estructura, color, profundidad de raíces y drenaje.
- Posteriormente se realizó la toma de muestras no disturbadas de cada horizonte para determinar las propiedades hidro físicas donde se empleará los anillos kopecky de 100 cm³ para analizar en laboratorio y determinar: capacidad de campo, punto de marchitez y saturación, densidad aparente, velocidad de infiltración, curva de pF y porosidad.

5.5.2. Constantes hidro físicas del suelo

Para determinar las constantes hidro físicas se empleó la siguiente metodología:

1. Saturación: se procedió a saturar las muestras hasta que el agua cubre completamente la parte superior del cilindro, lo que indica que la muestra ha alcanzado un estado de pF = 0 en relación a su volumen, equivalente a la porosidad total.
2. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente: las muestras fueron enviadas al laboratorio de Suelos, foliares y aguas de Agrocalidad para obtener los valores mediante el método de la centrífuga.
3. Densidad aparente: se utilizó el método del anillo volumétrico donde se pesan las muestras antes y después de colocarlas en la estufa por 48 horas mediante la siguiente ecuación se reemplazan los valores:

$$D_a \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Peso de la muestra seca a } 105 \text{ }^\circ\text{C (g)}}{\text{Volumen del cilindro muestriador (cm}^3\text{)}}$$

5.5.3. Evaluación de las condiciones físicas del suelo

Para la evaluación de las características físicas del suelo, se emplea el diagrama triangular. En la parte inferior se representan los porcentajes relativos al volumen de aireación, en el lado derecho del triángulo se observan los valores porcentuales del agua aprovechable y el lado izquierdo del triángulo muestra los porcentajes del volumen físicamente inerte del suelo (Valarezo et al., 1998).

5.5.4. Velocidad de infiltración

Se empleó el método del doble anillo que constó de dos cilindros, dispuestos en una disposición concéntrica. Las mediciones se realizaron en el cilindro interior, mientras que el cilindro exterior tenía la función de prevenir el flujo radial del agua durante la prueba de infiltración.

Una vez colocado se vertió el agua en el anillo interno y se realizaron tres repeticiones de 5, 10, 15 y 30 min hasta lograr un flujo estable.

5.6. Metodología para el segundo objetivo

Determinar el factor de correlación entre la demanda atmosférica y el contenido de humedad del suelo mediante el uso de tanque evaporímetro tipo "A" y tensiómetros con el fin de obtener la lámina de riego.

El procedimiento metodológico para determinar el factor de correlación fue el siguiente:

5.6.1. Instalación y calibración de los tensiómetros en campo:

a) Preparación

Según la metodología de Espinoza (2018):

- Se ubicó el tensiómetro en posición vertical en un recipiente con agua por 2 a 3 días para saturar la cerámica del tensiómetro para eliminar cualquier burbuja de aire

- Verificar si la lectura en el manómetro indica 0 centibares cuando la punta del tensiómetro se sumerge en agua.
- Se llenó el tubo con agua destilada esterilizada y alguicida para evitar las burbujas de aire se colocó el tensiómetro en posición inclinada y se vierte lentamente el agua.
- Con la bomba de succión se extrajo todo el aire presente en los tensiómetros
- Se selló la tapa correctamente.

b) Instalación de los tensiómetros en el suelo

- Marcar sobre la estaca la profundidad a la cual tiene que llegar el tensiómetro.
- Perforar con presión hasta la profundidad de las raíces (25-40 cm).
- Realizado los hoyos se introducen los tensiómetros, colocando una porción de suelo por los lados para una mayor firmeza de los aparatos.
- Finalmente, se formó un pequeño montículo de suelo alrededor del aparato para acumulación de agua alrededor del tubo.

c) Calibración del tensiómetro

- Se tomó muestras de suelo a diferentes lecturas del tensiómetro, se pesa y coloca en la estufa a 105°C por 24 horas para determinar el contenido de humedad gravimétrico, para posterior multiplicarlo por la densidad aparente y obtener en unidades de volumen.
- Finalmente, se realizó la curva de calibración entre el rango de -10kPa -50 kPa y el contenido de humedad del suelo para cada tensiómetro, a través de una regresión lineal para corregir los contenidos de humedad interpretados en los tensiómetros.

5.6.2. Registro de datos del tanque evaporímetro y tensiómetro

- Se hizo registros diarios de los datos de evaporación y precipitación, para determinar

la evapotranspiración se trabajó con los instrumentos (tanque evaporímetro y pluviómetro) de la estación meteorológica “La Argelia” ya que se encuentran en el mismo rango altitudinal, a una distancia menor de 200 m.

- Cabe recalcar que la toma de datos era de cuatro meses, pero por motivos externos (daño de la bomba del sistema de riego) se dificultó la toma de los mismos por lo cual solo dos meses fue posible realizar.
- Se regó a lecturas de -25kPa, -35 kPa y -45 kPa; y, se finalizó el riego cuando marcó -10 kPa o capacidad de campo.
- La tensión de -10kPa escogida para finalizar el riego se debe al criterio de que las raíces están activas cuando el potencial matricial es menos negativo.

5.6.3. *Calculó de la lámina de riego y tiempo de riego, mediante el tanque evaporímetro y tensiómetro.*

Según Valverde y Morocho (2014) el procedimiento para determinar las necesidades de riego con datos del tanque evaporímetro es el siguiente:

- La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$ET_o = K_p * E_p$$

Dónde:

ET_o evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

E_p evaporación media del Tanque (mm día⁻¹)

K_p coeficiente del Tanque

- Para la obtención del coeficiente de tanque K_p se utilizó la Tabla de la FAO 56 (Figura 7), con datos de velocidad el viento, ubicación del tanque y humedad relativa.
- Se determinó el K_c (Anexo 2) para la fase del cultivo de café, con el cual se calculó la evapotranspiración del cultivo de café (ET_c) de la manera siguiente:

$$ET_c = ET_o * K_c$$

Dónde:

- ET_c** evapotranspiración del cultivo de fresa (mm día⁻¹)
- ET_o** evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)
- K_c** coeficiente de cultivo

Para calcular la lámina de riego con el tensiómetro se empleó la metodología propuesta por Chow (2005) quien menciona que para poder calcular los requerimientos hídricos y la lámina aplicar en un cultivo los parámetros a calcular serán los siguientes:

- Se calculó la lámina a CC, por cada bloque.
- La eficiencia de aplicación del sistema de riego por goteo se consideró del 90%
- La lamina a aplicar se determinó mediante la diferencia entre la lámina a CC y la lámina a la tensión establecida (Bloque 1 a -25 kPa; bloque 2 a -35 kPa y bloque 3 a -45 kPa), multiplicada por el factor de humedecimiento del 20% para riego por goteo.
- Para la intensidad de la precipitación del sistema de riego, se tomó en cuenta la superficie de riego empleando la siguiente ecuación:

$$I_p = \frac{Q_e}{(dl \times de)} NL$$

Dónde:

- Q_e** caudal específico del gotero (Litros segundos⁻¹)
 - I_p** intensidad de precipitación (mm hora⁻¹)
 - dl** distancia entre laterales (m)
 - de** distancia entre emisores (m)
 - NL** número de laterales por hilera
- El tiempo de riego se empleó la siguiente ecuación:

$$Tr = \frac{Lb}{Ip}$$

Dónde:

Tr tiempo de riego (horas)

Ip intensidad de precipitación (mm hora⁻¹)

Lb lámina bruta (mm)

5.6.4. Análisis de datos recolectados

- Se tabuló los datos registrados
- Posteriormente se realizó el análisis de correlación en el software Infostat, con el fin de conocer si existe relación entre la evapotranspiración del cultivo determinada a través del tanque evaporímetro y el consumo de agua medido con los tensiómetros a través de la interpretación del potencial matricial.
- Finalmente, se analizó cada una de las relaciones obtenidas para determinar la lámina de agua a aplicar en el cultivo de café en su etapa inicial.

6. Resultados

6.1. Caracterizar las propiedades hidro físicas del área de estudio

6.1.1. Descripción de los perfiles

Calicata 1

Está compuesto por tres capas distintas:

- La primera capa, que se encuentra a una profundidad de 0 a 10 centímetros, presenta una textura franco-arenosa (FoAo) y un color oscuro.
- La segunda capa, conocida como A1, se extiende desde los 10 a los 25 centímetros de profundidad, y muestra una coloración menos oscura y una textura franco-arcillo-limosa (FoAcLo).

- El tercer estrato, denominado AC, abarca desde los 25 a los 40 centímetros de profundidad, es de color más claro y posee una textura franco-arenosa (FoAo) de origen aluvial y coluvial.

Calicata 2

Se trata de un suelo joven en el que se pueden identificar tres depósitos aluviales:

- El depósito más reciente se compone de los horizontes Ap (0 a 10 centímetros) con textura franco (Fo) y coloración oscura, así como un AC (10 a 25 centímetros) con textura franco-arcilloso-limosa (FoAcLo), que es oscuro, estructurado y carece de gravas.
- El siguiente depósito consiste en la capa 2C, que abarca desde los 25 centímetros hasta los 45 centímetros de profundidad. Presenta una textura arcillo-limosa (AcLo) con dos tipos de coloración y manchas, así como una fractura gleizada que indica la presencia de una lámina de agua acumulada. En la parte inferior de esta capa, se observa una capa de suelo oxidado.
- El primero de ellos, denominado 3C, es el más antiguo y está compuesto en un 70% por grava. No muestra estructura y tiene una textura arenosa (Ao). Este horizonte se extiende desde los 45 centímetros hasta los 100 centímetros de profundidad. Se pueden distinguir tres variaciones en la coloración en este estrato.

Calicata 3

Se ha observado que se trata de un suelo de origen aluvial, con una gran profundidad de hasta 120 centímetros. Está compuesto por tres capas distintas:

- El primer horizonte (Ap) abarca desde la superficie hasta los 25 centímetros de profundidad y presenta un bajo contenido de materia orgánica.
- El segundo horizonte, 2C, se extiende desde los 25 centímetros hasta los 50 centímetros, y el tercer horizonte, 3C, se inicia a los 50 centímetros y alcanza una profundidad de 120 centímetros.
- Este suelo es compacto, con una profundidad efectiva de aproximadamente 60 centímetros y tiene una textura arcilloso-limosa (AcLo). Se caracteriza por la

presencia de numerosas manchas, lo que indica un deficiente drenaje, pero no muestra grietas en ningún horizonte. En todos los estratos, no se detecta presencia de sales solubles ni indicios de actividad humana.

Figura 9. Perfiles de suelo del área de estudio.



6.1.2. Características hidro físicas del suelo

En el Tabla 6 se presenta los resultados de Capacidad de Campo a 1/3 de atm, Punto de Marchitez permanente a 15 atm, Agua Aprovechable, Densidad Aparente y Textura para las tres calicatas realizadas, estimados en porcentajes.

Tabla 6. Resultados de las características hidro físicas del suelo.

Calicata	Horizontes	Textura	Propiedades físicas				
			Da g/cm ⁻³	Profundidad cm	Saturación pF = 0	CC pF = 2,52 %θ _v	PMP pF = 4,2
B1	Ap	Fo	1,2	00 - 25	44,8	27,3	14,8
	A1		1,5	25 - 45	43,1	28,1	15,4
					44,0	27,7	15,1
B2	Ap	Fo	1,2	00 - 25	44,1	21,2	11,5
	Ac		1,4	25 - 45	32,4	24,2	13,1
					38,2	22,7	12,3
B3	Ap	FoLo	1,2	00 - 25	45,7	26,5	13,9
				25-40	46,4	28,0	15,6
					46,0	27,2	14,8

La textura en las dos calicatas es Franco a excepción de la calicata tres que presenta una textura franco limosa. El valor máximo de la Capacidad de Campo obtenida es de 28,14% de la calicata uno se encuentra en una clasificación (Media) y es la cantidad de agua que puede retener 100 g de suelo, de la misma manera el resultado más bajo es de 21,16% perteneciente a la calicata 2. El punto de Marchitez Permanente, se muestra que el valor más alto es de 15,44%, mientras que el más bajo es de 11,50%, perteneciente a la calicata 1 y 2 respectivamente. La Densidad Aparente considerada como una característica física, en términos de gramos por centímetro cúbico, oscila entre 1,17 y 1,48 g/cm³.

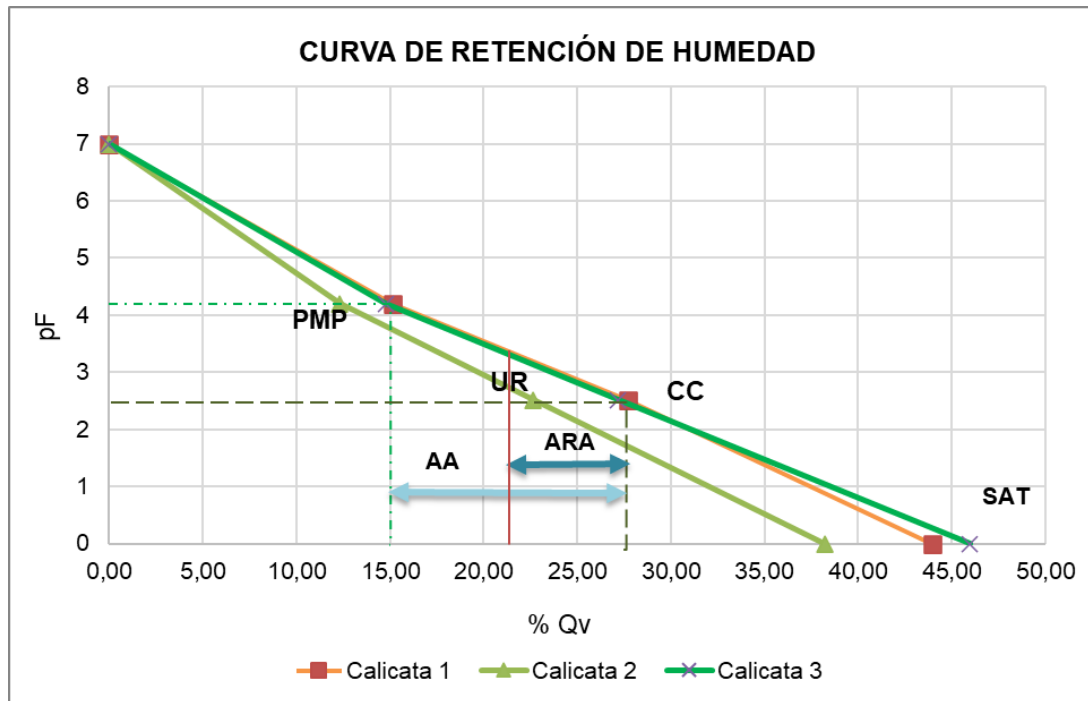
6.1.3. Evaluación de las condiciones físicas del suelo y curva de retención de humedad

Tabla 7. Evaluación de las condiciones físicas del suelo.

CONDICIONES FÍSICAS					
Horizontes	AA	CA	VFI	Zona	Clase
		%			
P1 Ap	12,5	17,5	70,0	II	Pobre
P1 A1	12,7	15,0	72,3	II	Pobre
	12,6	16,2	71,1		
P2 Ap	9,7	22,9	67,4	II	Pobre
P2 Ac	11,0	8,2	80,8	I	Muy pobre
	10,4	15,6	74,1		
P3 Ap	12,6	19,2	72,2	III	Medio
	12,3	18,4	65,4		
	12,4	18,8	68,8		

El diagrama triangular indica la permeabilidad y capacidad de aireación del suelo, como se muestra en la Tabla 7 la calicata 1 y 2 se clasifica dentro de la zona II, está es denominada pobre debido a las condiciones presentes en el suelo que no permite el desarrollo apto del cultivo, donde el movimiento de aire y agua es muy lento. Mientras que la calicata 3 pertenece a la zona III es una condición media. Por otra parte, aunque el área de estudio es aluvial, sus propiedades físicas son uniformes y los valores son similares en todas las calicatas.

Figura 10. Curva de retención de humedad de los tres perfiles del suelo.



En la Figura 10 se evidencia la curva de retención de humedad para las tres calicatas, donde se presentan los valores promedio de Capacidad de aireación (CA) es 19,75% clasificándose como medio, Agua aprovechable (AA) de 11,51% que es el agua disponible para el desarrollo de las plantas, el volumen físicamente inerte (VFI) de 68,74% y el estado poroso o saturación oscila entre los 40 a 46%.

6.1.4. Velocidad de infiltración del agua en el suelo

Tabla 8. Resultados de la velocidad de infiltración básica

Unidad de riego	Primera Prueba	Segunda Prueba	Tercera Prueba	Promedio
	mm/h			
1	52,1	102,4	87,7	80,7

La velocidad de infiltración básica realizada con tres repeticiones da un valor promedio de 80,7 mm/h, que concuerda con la clase textural del suelo, según los datos obtenidos se clasifica en moderadamente rápida lo que indica que el suelo posee una baja eficiencia para el riego por superficie y problemas con la lixiviación de nutrientes.

6.2. Determinar el factor de correlación entre la demanda atmosférica y el contenido de humedad del suelo mediante el uso de tanque evaporímetro tipo “A” y tensiómetros con el fin de establecer la lámina de riego óptima.

6.2.1. Balance hídrico con registros históricos

Los datos meteorológicos de la estación “La Argelia” correspondientes a un periodo de 22 años (1990 - 2016), que incluyen la temperatura y la radiación solar, variables necesarias para estimar la evapotranspiración de referencia con el software CROPWAT.

Tabla 9. Resultados del balance hídrico.

MESES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ET_o (mm/día)	3,21	3,28	3,25	3,21	3,25	3,21	3,21	3,52	3,73	3,68	3,64	3,40
K_c	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,90	0,91	0,93	0,94
ET_c (mm/día)	3,05	3,12	3,27	3,09	3,06	2,97	2,92	3,17	3,36	3,34	3,37	3,20
Pe (mm/día)	3,86	3,72	3,70	2,69	1,98	2,02	1,54	1,28	1,23	2,29	2,17	3,16
N_r (mm/día)	0	0	0	0,36	1,08	0,95	1,38	1,89	2,13	1,05	1,20	0,04
Eficiencia del sistema (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
N_B (mm/día)	-	-	-	0,40	1,20	1,05	1,54	2,10	2,37	1,17	1,33	0,05

Durante los meses de diciembre a abril, la cantidad de precipitaciones supera las necesidades de evapotranspiración, lo que resulta en un exceso de agua, siendo enero y febrero los meses con mayor cantidad de lluvias. Por otro lado, durante los meses de septiembre a noviembre, la cantidad de agua depositada a nivel de precipitaciones es menor a la cantidad que se evapora y se transpira, lo que se traduce en un período seco con déficit hídrico. Así mismo, entre el mes de noviembre y diciembre se observa que existe una diferencia en cuanto a las necesidades de riego, siendo de 1,20 mm/día y 0,04 mm/día respectivamente.

6.2.2. Balance hídrico del mes de noviembre y diciembre con datos medidos por el tanque y pluviómetro

En la presente Tabla se evidencian los valores diarios medidos por el tanque evaporímetro y pluviómetro en los meses de noviembre y diciembre para determinar el balance hídrico diario.

Tabla 10. Resultados del balance hídrico con datos medidos por el tanque y pluviómetro Estación La Argelia.

Días	Eto (mm/día)		Etc (mm/día)		Pe (mm/día)		Nr (mm/día)		NB (mm/día)	
	Nov.	Dic	Nov	Dic	Nov	Dic	Nov	Dic	Nov	Dic
1	4,2	3,7	3,9	3,5	0,0	0,2	3,9	3,3	4,3	3,6
2	0,0	0,8		0,8	0,0	0,3	0,0	0,5	0,0	0,5
3	0,0	0,4					0,2	0,0	-0,2	-0,3
4	0,0	0,1					0,4	0,0	-0,4	-0,4
5	0,0	0,0			1,6	1,4	-1,6	-1,4	-1,8	-1,6
6	2,4	1,1	2,2	1,0	1,6	1,3	0,7	-0,2	0,7	-0,3
7	3,5	2,3	3,3	2,2	0,0	0,6	3,3	1,6	3,6	1,7
8	2,5	1,4	2,3	1,3	0,2	0,5	2,1	0,9	2,3	1,0
9	2,9	0,9	2,7	0,8	0,0	0,1	2,7	0,8	3,0	0,9
10	3,1	1,7	2,9	1,6	0,1	0,3	2,8	1,3	3,1	1,4
11	0	0,2	0,0	0,2	1,5	0,8	-1,5	-0,6	-1,7	-0,7
12	0,0	0,3			3,4	1,7	-3,4	-1,7	-3,8	-1,9
13	1,4	0,8	1,3	0,8	3,5	1,6	-2,2	-0,8	-2,5	-0,9
14	2,6	1,1	2,4	1,0	0,2	0,4	2,3	0,7	2,5	0,7
15	1,3	0,1	1,2	0,1	7,4	2,6	-6,2	-2,5	-6,9	-2,8
16	2,4	0,3	2,2	0,3	0,1	0,4	2,2	-0,1	2,4	-0,1
17	0	0	0,0	0,0	0,4	0,7	-0,4	-0,7	-0,4	-0,8
18	0,1	0,1			0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1
19	0,2	0,2			0,0	0,5	0,0	-0,5	0,0	-0,5
20	0,4	0,0			4,0	1,3	-4,0	-1,3	-4,4	-1,4
21	5,5	2,1	5,1	2,0	0,0	0,4	5,1	1,6	5,7	1,8
22	4,4	1,4	4,1	1,3	0,0	0,5	4,1	0,8	4,5	0,9
23	5,1	0,1	4,7	0,1	6,8	1,0	-2,1	-0,9	-2,3	-1,0
24	0,8	0,4	0,7	0,4	5,8	1,8	-5,0	-1,4	-5,6	-1,6
25	0	0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1
26	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,9	0,1	0,8	0,1	3,6	0,0	-2,8	0,1	-3,1	0,1
28	0,2	0,1	0,2	0,1	1,1	0,0	-0,9	0,1	-1,0	0,1

29	2	1,1	1,9	1,0	0,2	0,4	1,6	0,7	1,8	0,7
30	3,6	1,4	3,3	1,3	0,0	0,5	3,3	0,8	3,7	0,9
31		0,8	0,0	0,8		0,7	0,0	0,1	0,0	0,1

Se observa que el mayor consumo de agua se da en el mes de noviembre con un valor máximo de 5,1 mm/día y el valor más bajo se dio en el mes de diciembre de 3,5 mm/día. Las necesidades hídricas del cultivo son notables para el mes de noviembre, caso contrario, en el mes de diciembre la precipitación era mayor que la evapotranspiración por ello los valores bajos.

6.2.3. *Potencial matricial y contenidos de humedad*

En la Tabla 11 se presentan los valores ajustados de contenido de humedad acorde a la ecuación de regresión para los tres bloques a una profundidad de 20 cm con diferentes tensiones (-25kPa, -35 kPa y -45 kPa)

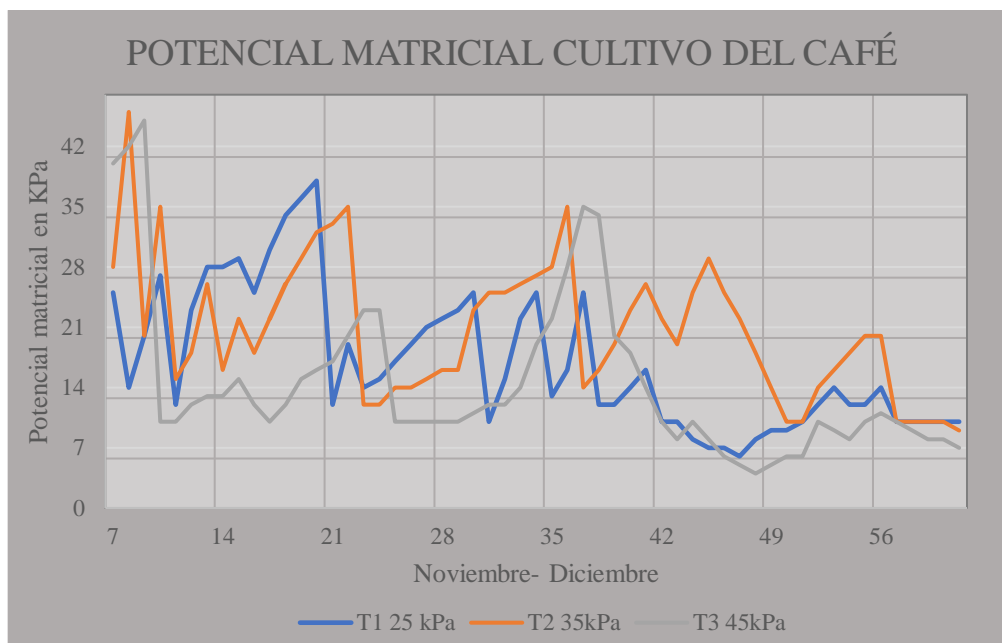
Tabla 11. *Ajuste de contenidos de humedad del suelo por medio de las ecuaciones de regresión.*

Tensiómetro	Ψ_m (kPa)	Θ_v %	Ecuación	Θ_v % Ajustado
T1 (-25kPa)	-35	10,4	$\Theta_v = 0,5679x + 29,65$ $R = -0,96$	10,9
	-22	17,3		16,7
	-17	19,8		20,0
	-10	21,1		22,3
T2 (-35kPa)	-43	20,3	$\Theta_v = 0,4816x + 39,96$ $R = -0,97$	19,3
	-30	25,2		25,5
	-25	27,8		28,0
	-16	32,5		32,3
T3 (-45kPa)	-50	17,7	$\Theta_v = 0,3567x + 34,077$ $R = -0,96$	16,2
	-38	20,2		20,5
	-21	23,5		26,6
	-18	27,4		27,7

La correlación entre la variable independiente (tensión) y la variable dependiente (contenido de humedad) muestra valores elevados lo que indica un alto grado de asociación entre las variables y los valores de coeficientes de correlación son negativos por su relación inversamente proporcional.

La siguiente figura muestra la variación del potencial matricial del suelo correspondiente a los dos meses en los tres bloques comprendido en el estrato 0-40 cm de profundidad. Los descensos indican aplicación de riego o precipitación.

Figura 11. *Potencial matricial en el cultivo de café comprendido en los meses (noviembre y diciembre).*



Tanto el T1 (-25 kPa) y T3 (-35kPa) muestran mayor número de descensos por riego o precipitación debido a la tensión establecida, por lo tanto, la frecuencia de riego fue menor en comparación con el tensiómetro 5.

A partir del día 42 el potencial comienza a descender consecuencia de las precipitaciones dadas.

6.2.4. *Cálculo de la lámina de riego para los tres bloques*

En la siguiente Tabla se presentan los valores obtenidos de las láminas de riego aplicadas para cada bloque, el periodo de registro de información corresponde a 2 meses (noviembre y diciembre).

Tabla 12. Láminas de riego aplicada en base a diferentes rangos de humedad en el cultivo de café.

Bloque	Lámina total	Lámina bruta mm	Lámina riego teórica	Lámina de riego ajustada	Ip mm/h	Tiempo calculado min	Tiempo en campo
BLOQUE							
1 (-25kPa)	150	167	13	9	6,0	120	30
BLOQUE							
2 (-35 kPa)	116	129	18	13	6,2	174	60
BLOQUE							
3 (-45kPa)	127	141	28	21	6,5	240	80

El bloque 1 para una tensión de -25 kPa tuvo mayor cantidad de riegos en comparación con los otros bloques debido a la baja tensión con una lámina de 9 mm. El tiempo de riego disminuyó y se calibró mediante observación de campo, ya que con 30 minutos de riego se alcanzó CC (10 kPa) a 30 minutos .

El bloque 2 con una tensión de -35 kPa con una lámina de 13 mm, además el tiempo de riego disminuyó de 2 horas a 1 hora, ya que con una hora de riego se alcanzó CC (10 kPa) a 30 minutos .

Para el bloque 3 (-45 kPa) únicamente se aplicó un riego en el mes de noviembre, en diciembre no fue necesario la aplicación de riegos por efecto de las precipitaciones y el suelo no alcanzó la lectura establecida. La lámina fue 21 mm, igualmente el tiempo de riego mermó a hora y media.

6.2.5. Consumo de agua mediante registro de tensiómetros en el cultivo de café

Se presentan los resultados totales de las láminas obtenidas en los dos meses con el tensiómetro y los valores del tanque evaporímetro Tipo A.

Tabla 13. Consumo de agua.

Bloque	N° de riegos	Lámina	Lámina	Tanque Tipo A		Método de Penman con registro histórico de variables climáticas	
		Noviembre	Diciembre	(mm/mes)		(mm/mes)	
		mm/mes		Noviembre	Diciembre	Noviembre	Diciembre
BLOQUE							
1	6	158	97				
(-25kPa)							
BLOQUE							
2	4	137	76	142,9	125,7	101,1	96,0
(-35kPa)							
BLOQUE							
3	1	68	47				
(-45kPa)							

El bloque 1 posee mayor cantidad de riegos con una lámina total de 158 mm en noviembre y 97 mm en diciembre, distribuidos en 6 riegos. Para el bloque 2, la lámina fue 137 mm y 76 mm para noviembre y diciembre respectivamente, con un total de 4 riegos. Finalmente, el bloque 3 posee una lámina de 68 y 47 mm para los dos meses con un riego por el potencial impuesto para la aplicación de riego. Los valores totales medidos por el tanque tipo A fueron 142,9 y 125,7 mm, mientras que los valores históricos para Penman obtenidos son de 101,1 y 96 mm para el mes de noviembre y diciembre respectivamente. Las necesidades hídricas para el mes de noviembre son mayores por lo cual es necesario la aplicación de agua mediante riego.

6.2.6. Correlación entre consumo de agua medido con tensiómetro y tanque evaporímetro tipo A

En los gráficos posteriores se presenta la correlación entre los distintos bloques a diferentes potenciales (-25KPa; -35KPa y -45KPa) y el tanque evaporímetro tipo A.

Figura 12. Correlación entre el consumo de agua bloque 1 y el tanque evaporímetro tipo A.

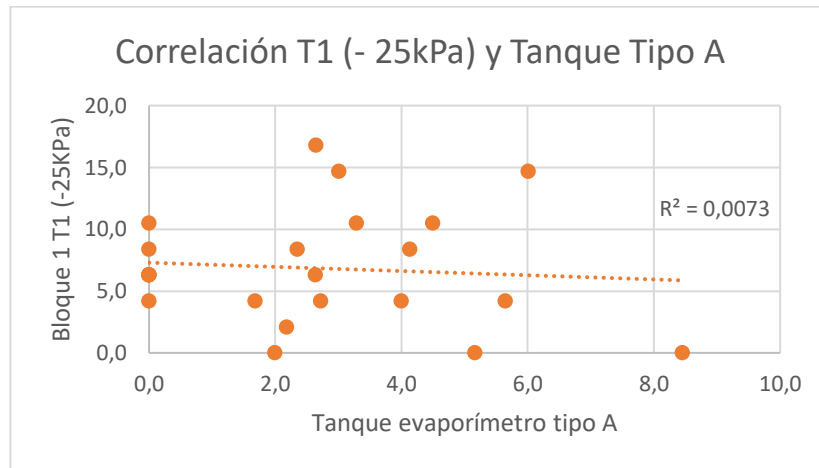


Figura 13. Correlación entre el consumo de agua bloque 2 y el tanque tipo A.

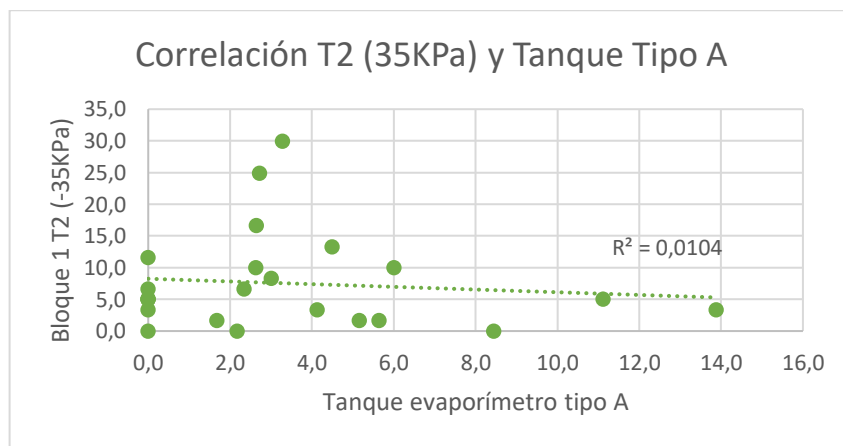
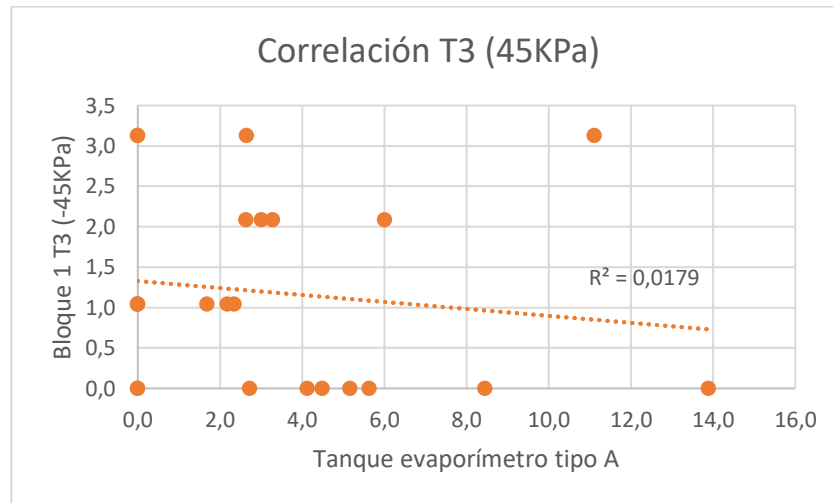


Figura 14. Correlación entre el consumo de agua bloque 3 y el tanque tipo A.



La correlación entre los tres bloques con el tanque tipo A se interpreta como baja débil donde los valores de una variable tienden a incrementar mientras que los otros disminuyen. Hay que tomar en cuenta que la correlación no implica causalidad ya que puede haber factores que influyan en la relación.

7. Discusión

Caracterización de las propiedades hidro físicas

7.1.1. Descripción del perfil

La textura del suelo es condicionada por el material parental presente y los procesos evolutivos del suelo, según White (2006) los suelos con arena y limo consisten en cuarzo y feldspatos y en menor proporción micas, piroxenos, andisoles y olivino; mientras que las arcillas son minerales secundarios y determinan el comportamiento y la actividad físico-química del suelo.

En la descripción de los perfiles de suelos caracterizan por tener un horizonte Ap en la superficie. En profundidad, los perfiles poseen horizontes con texturas que van desde franco arenoso hasta arcillo limoso. Según Jaramillo (2002) señala que el horizonte Ap suele encontrarse en la superficie del suelo y está compuesto por minerales con acumulación de materia orgánica y propiedades derivadas de perturbaciones. En el perfil 3 existe presencia de manchas de color rojo amarillento en los horizontes 2C y 3C, y según CRS (2020), esto indica problemas de drenaje que afectan el crecimiento de las raíces debido a la falta de

oxígeno. La profundidad efectiva de los perfiles va desde 100 a 120 cm. De acuerdo con Pinto et al. (2004), esto clasifica al suelo como profundo.

La zona de estudio posee un suelo de origen aluvial con pendientes que varían entre 3-6% clasificándose como suavemente inclinadas, según Valarezo et al. (2007) los suelos de la zona sur mayoritariamente corresponden a depósitos aluvio-coluvial con pendientes suaves que van desde (2-6%) a inclinadas (12-50%).

7.1.2. Constantes hidro físicas

La densidad aparente presente en el suelo oscila entre 1,20 y 1,48 lo que según Thompson y Troeh (2002) se clasifica como un suelo mineral y las variaciones de la densidad radica en las diferencias en el volumen total de los poros, materia orgánica, textura, etc. Según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) el valor se encuentra dentro del rango óptimo inferior a 1,44 g cm³ adecuado para agricultura, valores superiores a este indican suelos con mal manejo y hay que tener en cuenta que a mayor profundidad del suelo existe un aumento en la densidad aparente.

Igualmente Wolf y Snyder (2003) mencionan que la variación de la densidad aparente viene influenciada por la MO y la textura del suelo, asociado con las prácticas de manejo; en suelos de textura fina la densidad aparente varía entre 1 y 1,2 g cm³ mientras que en suelos arenosos es mayor y oscilan entre 1,2 y 1,6 g cm³

Según Nawaz et al. (2012) una densidad aparente elevada es ocasionada por la disminución del espacio poroso producido por el mal uso de maquinaria agrícola y excesivo pastoreo lo que conlleva a una compactación del suelo y genera consecuencias a los cultivos.

Potro lado, la saturación promedio es de 44,96% en las tres calicatas lo que indica un rango alto y acorde a la textura indicada anteriormente.

7.1.3. Curva de retención de humedad

Según la Tabla 6, en el suelo de la Quinta Experimental “La Argelia” la capacidad de campo y punto de marchitez de la calicata 1 y 3 es 27 y 15 respectivamente que representa el contenido de humedad que las plantas no logran extraer y entra en el rango de textura de franco arcillosa según lo expuesto por Martín de Santa Olalla y de Juan Valero (1992).

Los valores de capacidad de campo y punto de marchitez de la calicata 2 son 22,66 y 12,31 lo que concuerda con los porcentajes promedio indicados por Castellanos et al. (2000) para la textura Franco.

De acuerdo con Yagüe (2003); Caicedo et al. (2021); Vega (2011) existen diversos factores que afectan la capacidad de retención del agua en el suelo, como: textura ya que los suelos finos retienen más agua en comparación con los de textura gruesa, estructura si poseen una estructura bien desarrollada tienden a retener más agua que los suelos compactos, materia orgánica presente, espesor del suelo y los diferentes estratos presentes en el perfil.

La capacidad de aireación es de 16,9 lo cual se interpreta como una clasificación alta y presenta una buena aireación, de igual manera el valor del agua aprovechable fue 11,51; este valor entra en el rango propuesto por Flores de AA que oscila entre 10 y 15 % apropiada para el desarrollo de las plantas. Kirkham (2014) coincide con su estudio y afirma que los suelos con mayor contenido de AA producen más biomasa vegetal que los suelos con menor contenido. Por otro lado, el volumen de poros físicamente inerte fue de 68.74%, valor promedio que sugiere un predominio de partículas de arena, y finalmente se evalúa la condición física del suelo en el diagrama triangular y se clasifica como "Muy pobre".

7.1.4. Velocidad de infiltración

El valor de la velocidad de infiltración de 80,7 mm/h se clasifica moderadamente rápida correlacionándose con la textura del suelo y concuerda con la investigación realizada por Cisneros (2003) debido a la textura del suelo donde la distribución de los poros condiciona la tasa de infiltración siendo más rápida la infiltración en un suelo arenoso que en suelo arcilloso. Igualmente, Valarezo (2011) señala que la vegetación presente en el suelo ejerce un efecto positivo en la infiltración del agua caso contrario en suelos desnudos donde es menor.

Morgan, et al. (1997); Ortiz y Ortiz (1980) indica que la velocidad de infiltración puede ser afectada por las condiciones del suelo como materia orgánica presente, textura, estructura.

Determinar el factor de correlación entre la demanda atmosférica y el contenido de humedad del suelo mediante el uso de tanque evaporímetro tipo “A” y tensiómetros con el fin de obtener la lámina de riego.

7.1.5. Balance hídrico

Según la investigación de Rodgers (1994) se concluye que el régimen de evapotranspiración potencial en la Provincia de Loja, especialmente durante los meses de septiembre, octubre y noviembre, constituye un período crítico para el crecimiento y desarrollo de los cultivos debido a la escasez de humedad en el aire y en el suelo. En la mayoría de las áreas de la provincia, resulta necesario recurrir al riego para llevar a cabo la agricultura entre julio y noviembre. Esta observación se respalda con los datos presentados en la Tabla 9, que revela que estos meses son los más críticos y demandan la implementación de riego adicional.

Los resultados del balance hídrico diario, obtenidos a través del tanque evaporímetro y el pluviómetro, exhiben similitudes con el histórico. En particular, se destaca que en noviembre la evapotranspiración alcanza su punto máximo con un valor de 5,1 mm/día, seguido de diciembre con 3,5 mm/día. A partir del día 20 de diciembre, se evidencia un aumento en la precipitación que supera la evapotranspiración, indicando que en ese periodo el cultivo no requería riego complementario.

7.1.6. Potencial matricial y contenido de humedad

Durante los primeros días del mes de noviembre los tensiómetros marcaron lecturas altas por ello se requirió en los tres bloques el aporte de riego como lo indica el balance hídrico, el mes de noviembre posee mayor evapotranspiración en comparación con el resto de los meses. La Figura 11 muestra el patrón de variación de la tensión de humedad del suelo en los 40 días a los 20 cm de profundidad, a partir del día 42 la tensión de humedad se mantuvo alrededor de 10kPa la mayor parte de tiempo por efecto de la lluvia registrada. Ya que según Valarezo (2011) , menciona que el aporte de las precipitaciones puede alterar los tiempos y frecuencias de riego., lo cual se vio evidenciado en la presente investigación.

7.1.7. Cálculo de la lámina de riego

La cantidad de agua aplicada durante los dos meses varió significativamente entre los tratamientos con distintas tensiones. En el bloque 1 (-25kPa), se observa un mayor número de riegos, cada uno con una lámina de 9 mm. En contraste, el menor consumo se registró en el rango de tensión de -45kPa, donde se aplicó una lámina total de 21 mm en un solo riego. Estos resultados coinciden con la investigación llevada a cabo por Valverde y Morocho (2014), quienes también reportaron un mayor consumo de agua en el tratamiento 2 a -25kPa.

De manera similar, Faria y Rubens (2005) señalan que el desarrollo vegetativo y actividad radical tiende a ser más pronunciado cuando el cultivo se somete a un mayor contenido de humedad, además, el riego localizado influye en el aumento del rendimiento y está en dependencia de la cantidad de agua que se aplique.

7.1.8. Consumo de agua mediante registro de tensiómetros en el cultivo de café

Según se aprecia en la Figura 11, el tratamiento 1 registra el mayor número de riegos debido a la lectura establecida, aunque la cantidad de agua aplicada en cada riego es menor en comparación con los otros tensiómetros. En contraste, el tratamiento 3 presenta menos riegos debido a su lectura de -45 kPa. Estos hallazgos coinciden con la investigación realizada por Valverde y Morocho (2014), donde se observó un mayor número de riegos en el tratamiento a -25 kPa. Asimismo, los tratamientos T3 y T4 (-40 kPa y -55 kPa) mostraron menos riegos debido al intervalo de días establecido para el riego.

En concordancia con lo expuesto por Levy y Boman (2003), programar los riegos a tensiones menores mejora la eficiencia del agua y reduce las pérdidas por evaporación, escurrimiento y percolación profunda. Esto se debe a que la absorción máxima del sistema radicular ocurre a una profundidad de 20 cm. La elección del T1 (-10 kPa a -25 kPa) se basa en la menor frecuencia de riegos, lo que minimiza el estrés hídrico en las plantas.

El aumento significativo en el número de riegos en el bloque 1 (-25 kPa) en comparación con el bloque 3 (-45 kPa) se atribuye a la relación inversa entre el consumo de agua y el rango potencial matricial. De acuerdo con Grasso et al. (2022) a medida que el suelo se seca, la presión del agua dentro del tensiómetro aumenta, mientras que en suelos más húmedos, la tensión disminuye y la lectura del manómetro tiende a acercarse a cero y al simular los tensiómetros el comportamiento de las raíces, se demuestra que las plantas sometidas a menores tensiones deben realizar un menor trabajo para absorber agua. Lo que

incrementa su tasa de absorción y desencadena un mayor flujo de evapotranspiración, apertura estomática y por ende el proceso fotosintético de la planta para la elaboración de foto-asimilados (Flexas et al., 2013).

7.1.9. *Correlación entre consumo de agua y tanque tipo A*

La ausencia de correlación entre las variables se debe a diversos factores, tales como la distancia entre el cultivo y el tanque, microclima presente y las condiciones ambientales, como señala Roy-García et al. (2019) en su investigación, es crucial comprender que la correlación no implica causalidad, es decir, el cambio en una variable no necesariamente depende de la otra. Además, resulta imperativo tener en cuenta otras variables significativas, como la cantidad de agua presente en el suelo, las características propias del cultivo y el entorno circundante. Es relevante destacar que la correlación puede experimentar alteraciones en condiciones climáticas cambiantes o en sistemas agrícolas particulares.

Con base, a lo menciona en el párrafo anterior el sistema agroforestal del área de estudio donde se encuentra el cultivo de café toma relevancia, ya que según Shibu (2009) este tipo de cultivos combinados con plantas forestales crean un micro clima que altera el balance hídrico por el sombramiento y cortina de viendo que generan. Estos cambios pueden tener efectos significativos en la cantidad y distribución de la precipitación, la evapotranspiración y la infiltración del agua en el suelo.

Así mismo, la falta de correlación puede deberse al bajo número de registro obtenidos (dos meses), ya que según Alzahrani (2020) para poder hacer un análisis con mayor peso de los factores analizados se debe trabajar una data extensa que permitan analizar el comportamiento de los mismos.

8. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye:

- Los resultados indican que la densidad aparente, porosidad, textura del suelo, en los tres bloques, bajo las mismas condiciones del cultivo, son de características similares.
- El contenido de humedad promedio en términos de volumen para los tres bloques son: Saturación 44,96%, CC 25,21% y PMP 13,76 %, clasificándose fertilidad física del suelo como pobre a excepción del tercer bloque esto de acuerdo a las propiedades hidro físicas del suelo donde: AA es de 11,51%, CA de 19,75% y VFI de 68,74.
- La correlación entre el consumo de agua calculado por tensiómetro y el método de tanque evaporímetro tipo A es baja, por diversos factores como: sombramiento, microclima, condiciones del cultivo, que difieren a las condiciones del tanque evaporímetro.
- Los resultados de correlación no son concluyentes y al evidenciar que hubo un mayor consumo de agua en el T1, como producto que las plantas sufren menos estrés hídrico al tener un intervalo menor riego se determina que se debe aplicar la lámina del T1 (-10kPa a -25kPa) para el cultivo de café.

9. Recomendaciones

- Es necesario tomar en cuenta el periodo anual del cultivo para realizar el análisis de correlación, debido a las limitaciones temporales de la investigación la recopilación de datos se llevó a cabo únicamente durante dos meses.
- En investigaciones relacionadas con otros cultivos, es importante tener en cuenta la profundidad radicular para obtener datos más precisos se sugiere la instalación de dos tensiómetros
- Para un análisis completo, es esencial realizar investigaciones más exhaustivas e incluir un mayor número de variables.
- Se recomienda instalar el tanque evaporímetro tipo A dentro del sistema agroforestal para que esté influenciado por las condiciones del cultivo
- En caso de realizar un estudio de calibración, similar al de la presente investigación, para el ciclo completo de la fenología del cultivo de café se debe asegurar un suministro constante de agua a lo largo de todo el proceso.

10. Bibliografía

- Allen, R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Serie Cuadernos Técnicos. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Alocén, J. C. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*. <https://www.fao.org/3/at787s/at787s.pdf>
- Alzahrani, H. (2020). A Comparison of Three Models in Multivariate Binary Longitudinal Data Analysis: Application to FDCS Study. *OALib*, 07(02), 1-13. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106030>
- ANACAFÉ. (2021). *Guía de variedades de café y selección de semilla*. 71.
- Aspiazu Villavicencio, K., Navarro Moncayo, J., & Mendoza, O. (2009). *Proyecto de comercialización del café de habas (café orgánico) actuando como intermediario para el consumo local en la ciudad de Guayaquil y como una opción de exportación* [bachelorThesis]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/7693>
- Bautista, C., Etchevers, J., Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores: *Ecosistemas*, 13(2), Article 2. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/572>
- Bejarano, W. (2017). *Factores de la producción agrícola*. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/4726/6/iniapscFe-1%20A.V..pdf>
- Brouwer, C., Goffear, A., & Heibloem, M. (s. f.). *Irrigation water management: Training Manual No. 1—Introduction to irrigation* [1985]. FAO Land and Water. Recuperado 23 de mayo de 2023, de <https://www.fao.org/3/r4082e/r4082e00.htm>
- Cadena, V. H. (2016). *Hablemos de riego* (2. ed). CONGOPE.
- Caicedo, L. C., Méndez, F. D. J., Gutiérrez, E., & Flores, J. D. J. A. (2021). Medición de humedad en suelos, revisión de métodos y características. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(17), 1-8. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035>

- Calvache, A. (2013). *Riego Andino tecnificado para fertirriego*. Editorial Universitaria. https://www.researchgate.net/profile/Angel-Calvache-Ulloa/publication/337484474_RIEGO_ANDINO_TECNIFICADO_PARA_FERTIRRIEGO/links/5ddb307d92851c1fedaf59e9/RIEGO-ANDINO-TECNIFICADO-PARA-FERTIRRIEGO.pdf
- Calvache, M. (1997). *Investigaciones preliminares para determinar la capacidad de absorción del Zn-65 en maíz (Zea mays L.)*. Universidad Central del Ecuador.
- Calvache, M. (2009). *Física de suelos*. Universidad Central del Ecuador.
- Calvache, M. (2010). *Física de Suelos aplicada a la Agricultura*. Universidad Central del Ecuador.
- Cañón, M. (2018). *Determinación de las necesidades hídricas en un cultivo de café, en etapa productiva, con base en el conocimiento del balance hídrico*. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3627>
- Carpena, M., & Ritter, R. (2005). *Hidrología Agroforestal*. Mundi-Prensa Libros. <https://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484762454/hidrologia-agroforestal>
- Carrillo, J. (2014). *Determinación de los requerimientos de riego del cultivo de la achira y sus estados fenológicos, con riego por aspersión, en el sector cabrería- chumberos, perteneciente al sistema de riego palmira*. [Magister en Riego]. Universidad Nacional de Loja.
- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP*. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.
- Castro, C. (2009). *Diseño de Sistemas de Riego: Fundamentos*. Artículos Varios (Knols). <https://elknol.wordpress.com/article/disenio-de-sistemas-de-riego-fundamentos-1i29ptfum49sf-5/>
- Chavarría, F. (2007). *Manual práctico de riego y drenaje*.
- Chow, L. (s. f.). *Fto2 Requerimientos de Riego*. Recuperado 17 de junio de 2023, de http://www.riego.elesteliano.com/ayuda/Fto2_Requerimientos_de_riego.htm

- Clunes, & Pinochet, D. (2014). Variación temporal del contenido de materia orgánica en dos suelos volcánicos bajo diferentes manejos agrícolas. *Agro Sur, III*.
- COFENAC. (2014). *Situación actual de la caficultura: Perspectivas*. [Técnico]. Consejo Cafetalero Nacional.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2.^a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Cortez Mojica, G. J., & Tercero Mercado, J. J. (2014). *Efecto de tres láminas de riego por goteo en época seca sobre el estímulo de la floración y producción de café (Coffea arabica L. Var. CATRENIC), finca San Dionisio, San Marcos, Carazo 2013* [Engineer, Universidad Nacional Agraria, UNA]. <https://repositorio.una.edu.ni/2757/>
- Edward, C. (2010). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo? *The University of Arizona College of Agriculture and Life Sciences Tucson*, 9.
- Enciso, J. M., Porter, D., & Périès, X. (2007). *Uso de sensores de humedad del suelo para efficientizar el riego*.
- Escalante, E. F. (2008). *La calidad de las aguas en función de su uso*. Enrique Fernández Escalante.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo, Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje).
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>
- FAO. (2018). *FAO's Global Information System on Water and Agriculture*. <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>
- FAO. (2023). *Conservación del Suelo y Agricultura | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-biodiversity/conservacion-del-suelo-y-agricultura/es/>
- Faria, R. T. D., & Rubens, R. (2005). Produtividade do cafeeiro e cultivos intercalares sob diferentes regimes hídricos. *Bragantia*, 64(4), 583-590. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000400008>

- Fernández, L., & Rojas, N. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*.
- Flexas, Niinemets, U., & Barbour, M. (2013). *Diffusional conductances to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency—PubMed*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov.translate.google/23670217/>
- Fuente, A. (2006). *Programación de riego con tensiómetros*. <http://http.v/www.tensiometrosuelo/agua.html>
- Gavilánez, F., & Farias, C. (2019). Método del Cenirómetro como alternativa de programación de riego por aspersión en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*). *Acta Agronómica*, 68. <https://doi.org/10.15446/acag.v68n1.70370>
- Grasso, R., Berrueta, C., Giménez, G., & Alzugaray, J. (2022). *Cuándo y cuánto regar?. Manejo del riego con tensiómetros en cultivos hortícolas protegidos*. 69, 84.
- Guy, S. (2014). *Las necesidades hídricas de cultivos*. SMART Management. <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/waterrequirements-of-crops>
- Herreros, J., & Espinoza, F. (2011). *Los recursos naturales en el desarrollo agropecuario*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/33074/S8100694_es.pdf?sequence=2&isAllowed=y#:~:text=Las%20dos%20condiciones%20ambientales%20primeras,y%20vegetaci%C3%B3n%20natural%20y%20bosques.
- Hidalgo, M. (2008). *Diseño, evaluación e instalación de un sistema de riego* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/14331>
- Hudson, N. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*. <https://www.fao.org/3/t0848s/t0848s00.htm>
- Hurtado, L. (2002). *Fundamentos del riego*. http://agricola-unl.com/pdf/Fundamentos_Riego.pdf
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147701>

- Lachimba, S. (2014). *Uso potencial del suelo para el cultivo de pasturas en las zonas de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo Ecuador. Quito*. [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6715/1/UPS-YT00036.pdf>
- León, J. (2018). *Determinación de requerimientos hídricos en el cultivo de lechuga (lactuca sativa) var. Winterhaven en base al tanque de evaporación tipo a y formulas empíricas (fao) en macaji, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo* [ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO]. <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/8729/1/13T0861.pdf>
- Levy, Y., & Boman, B. (2003). *Water Management in Citrus*. https://www.researchgate.net/publication/293334460_Water_Management_in_Citrus
- López, J. (2007). *Necesidades hídricas de los cultivos*. https://calificaciones.weebly.com/uploads/1/0/6/5/10652/unidad_iii.pdf
- Macas, J. (2019). *Análisis de las correlaciones entre propiedades índice y mecánicas con la resistividad eléctrica de suelos granulares en la zona 1 de la ciudad de Ambato*. 207.
- Monge, J. (2016). *Propiedades físicas y químicas del sistema suelo*. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/83646/Suelos.pdf?sequence=1>
- Moratiel, R. (2017). *Riego en cultivos: Fundamentos y manejo*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Morú, P. (2005). *Diseño de riegos y manejo del agua en el campo*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/2486/1/T-UCE-0004-64.pdf>
- Niño, J. A., Cuervo, J. L., & Villalobos, R. (2014). Efecto del potencial mátrico del suelo en el crecimiento del cultivo de estevia (*Stevia rebaudiana* Bert.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2), 240-251. <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i2.2238>
- Padilla, W. (2007). *Fertilización de suelos y nutrición vegetal*.
- Parra, Insunza, F., Solano, C., & Zizumbo, D. (2019). *El proceso de producción agrícola* (Vol. 13). A.U.D.Y. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1659/1/1986_Parra_Proceso.pdf

- Pérez, L. (2006). *Tecnología para el Riego*. CONCYTEC.
- Porta, C., López - Acevedo, & Roquero, C. (2015). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3.ª ed.). Mundi-Prensa Libros.
- Rivera Bolaños, M., & Rivera, J. (2021). *Diseño, operación y mantenimiento del sistema de riego para la comunidad Pull-Quishuar del cantón Guamote de la provincia de Chimborazo* [bachelorThesis, Quito: UCE]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22696>
- Rodgers, K. (1994). *Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Loja*. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente.
- Rodríguez, J. (2014). *Determinación del uso consuntivo del cultivo de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.), variedad ICA QUIMBAYA; utilizando el lisímetro de pesaje en la granja experimental La Argelia, Loja* [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12421/1/Jos%c3%a9%20Luis%20Rodr%c3%adguez%20Soto.pdf>
- Rodríguez-Jaume, M.-J., & Mora Catalá, R. (2001). *Análisis de regresión simple*. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/12076>
- Rondon, E. (2016). *Diseño de un sistema de riego para el cultivo de alfalfa en la localidad de Cotaparaco, provincia de Recuay, región de Ancash* [Universidad Nacional «Santiago Antuñez de Mayolo»]. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1451>
- Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., Palacios-Cruz, L., Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., & Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: No toda correlación implica causalidad. *Revista alergia México*, 66(3), 354-360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Rucks, L., García, Kaplán, A., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Dpto. Suelos y Aguas. <https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>
- Santistevan, M. S., Julca, A. J., & Borjas, R. B. (2016). Sustentabilidad de fincas productoras de café en Jipijapa (Manabí, Ecuador). *Saber y Hacer*, 3(1), Article 1.
- Sapir, E., & Sneh, M. (2002). *Riego por aspersión*. Mapa. <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de->

conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/material-de-riego/aspersion.aspx

- Shibu, J. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Silva, P., Silva, H., Garrido, M., & Acevedo, E. (2015). *Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos*. 86.
- Smajstrla, A., & Harrison, D. (2011). *Tensiometers for soil moisture measurement and irrigation scheduling*. 8.
- Thompson, L., & Troeh, F. (2002). *Los suelos y su fertilidad* (4ª). Reverté S.A. https://www.reverte.com/libro/los-suelos-y-su-fertilidad_91568/
- Valverde, L. O., & Morocho, J. E. (2014). *Determinación del rango óptimo del potencial matricial del suelo en el cultivo de fresa (fragaria vesca) bajo riego por goteo en la Estación Experimental La Argelia* [bachelorThesis, Loja: Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/11782>
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la ingeniería de riegos*. Q&P Impresores S.R.L.
- Vega, A. (2019). *Programación y control del riego y la fertilización de los cultivos*. Ediciones Paraninfo, S.A. https://www.google.com.ec/books/edition/Programaci%C3%B3n_y_control_del_riego_y_la_f/HSWVDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0
- Vega, N., González, A. M., & Elorza, P. (2023). *La importancia del suelo en la producción agrícola*. <https://oa.upm.es/41418/>
- Vega, V. (2011). *Diseño de un sistema de riego a gravedad* [Universidad San Francisco de Quito]. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1368/1/102382.pdf>
- Wolf, B., & Snyder, G. (2003). *Sustainable Soils: The Place of Organic Matter in Sustaining Soils and Their Productivity*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367807443>
- Yagüe, J. L. F. (2003). *Técnicas de riego*. Mundi-Prensa Libros.

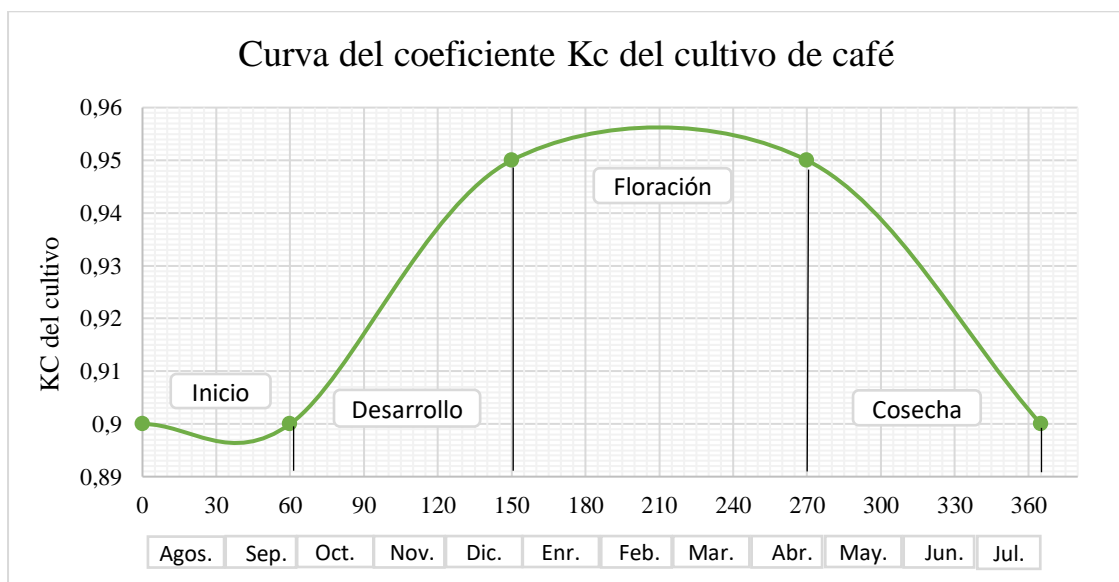
Zotarelli, L., Dukes, M., & Morgan, K. (2019). *Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad*. Askifas. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE496>

11. Anexos

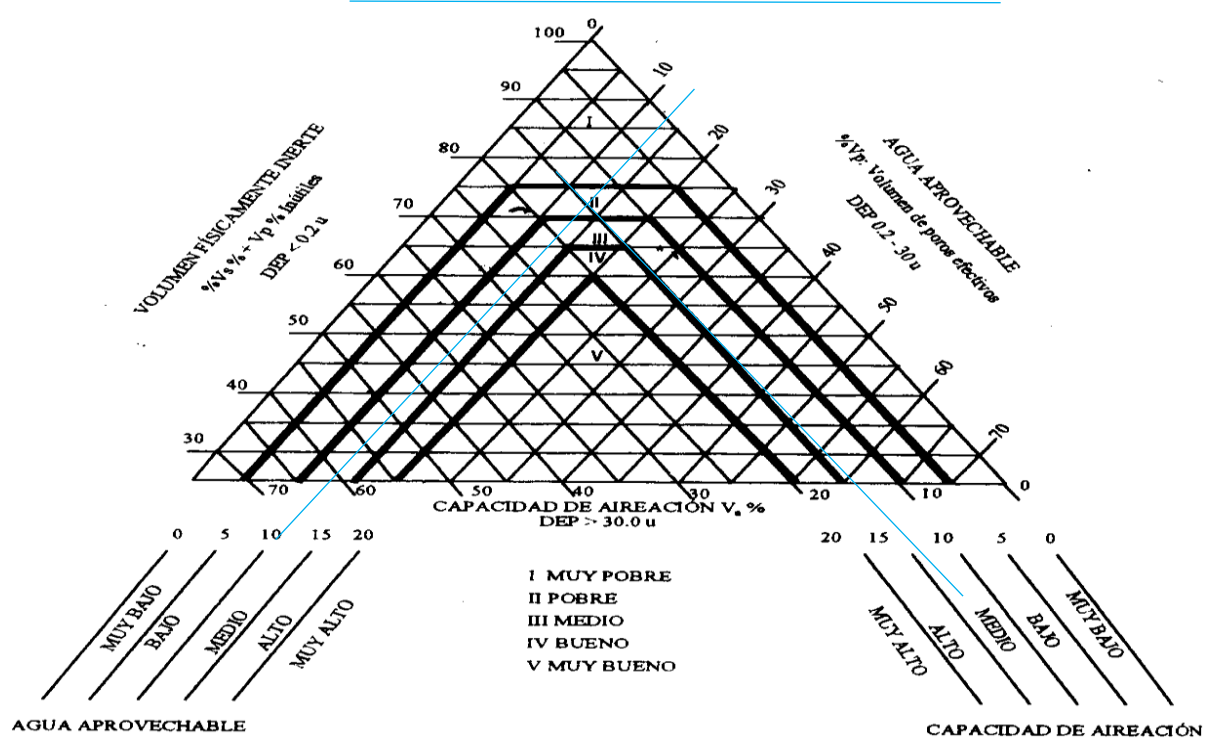
Anexo 1. Instalación y calibración de los tensiómetros



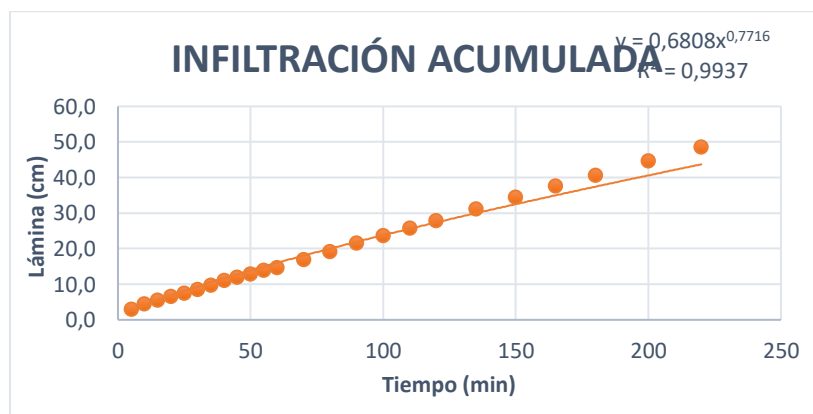
Anexo 2. Curva del coeficiente Kc del cultivo de café



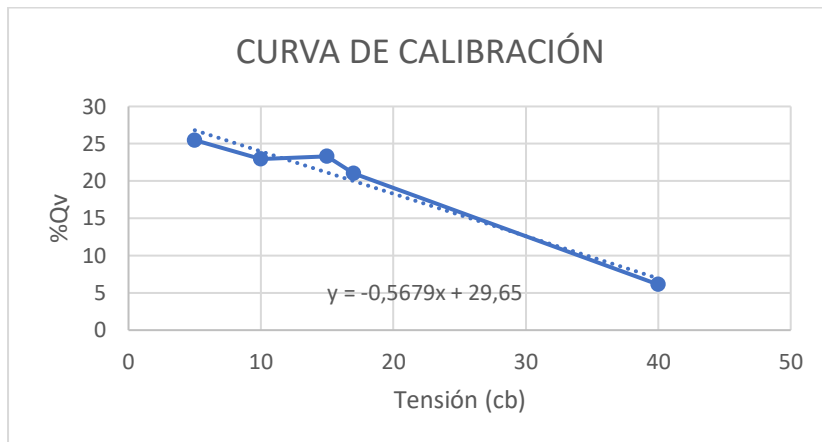
Anexo 3. Diagrama para evaluar las condiciones físicas del suelo



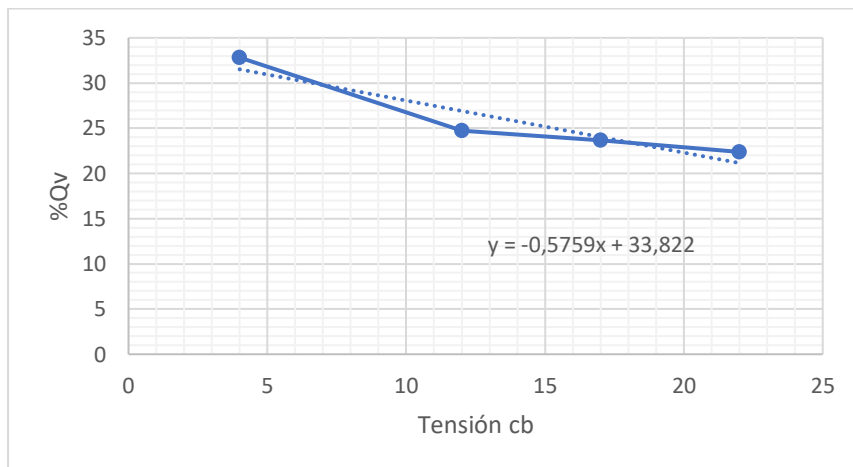
Anexo 4. Curva de infiltración del agua en el suelo.



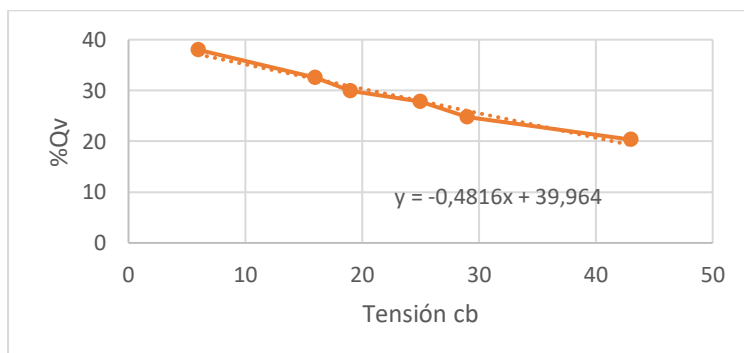
Anexo 5. Curva de calibración bloque 1 (25KPa) profundidad 20 cm



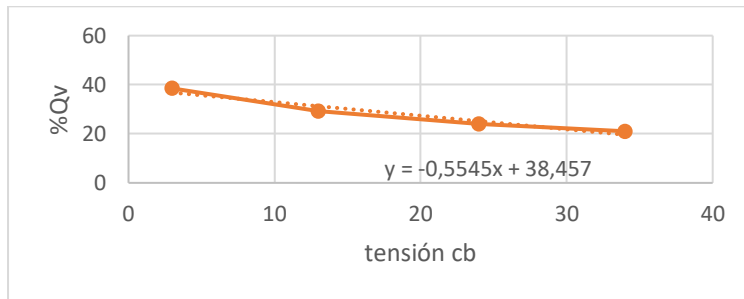
Anexo 6. Curva de calibración bloque 1 (25KPa) profundidad 40 cm



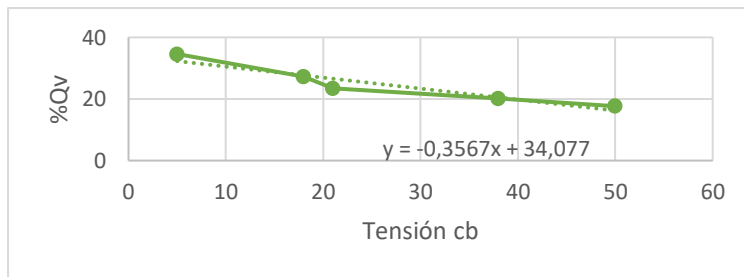
Anexo 7. Curva de calibración bloque 2 (35KPa) profundidad 20 cm



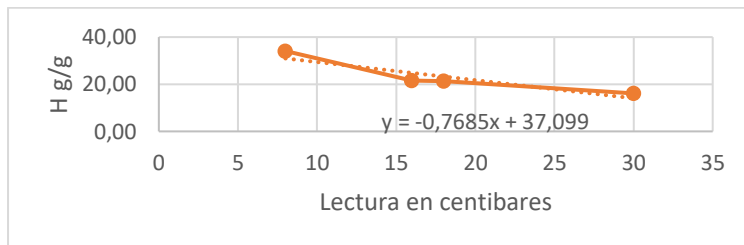
Anexo 8. Curva de calibración bloque 2 (35KPa) profundidad 40 cm



Anexo 9. Curva de calibración bloque 3 (45KPa) profundidad 20 cm



Anexo 10. Curva de calibración bloque 3 (45KPa) profundidad 40 cm



Anexo 11. Certificado traducción del resumen

Loja, 05 de febrero de 2024

Yo, Elyan Miguel Torres Cabrera, con número de cédula 1150175055, Licenciado en Ciencias de la Educación con Mención en Inglés.

CERTIFICO:

Haber realizado la traducción textual del documento adjunto, correspondiente al trabajo de titulación denominado: **Determinación de la correlación entre la demanda atmosférica y contenido de humedad del suelo para establecer la lámina de riego a aplicar en el sistema agroforestal con café (*Coffea arabica* L.) en la Quinta Experimental "La Argelia"**, elaborado por Stefany Lisbeth Andino Armijos, con número de cédula 1105814048.

Es todo lo que puedo certificar en honor a la verdad, facultando al portador el presente documento para el trámite correspondiente.

Atentamente. -

Lic. Elyan Torres Cabrera
C.I: 1150175055
Telf.: 0984661493
Correo electrónico: torreselian737@gmail.com