

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE DOCENCIA

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



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

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO CON VIAJERO
AUTOPROPULSADO EN LA FINCA MONA, COMPAÑÍA PALMA
TICA, QUEPOS.**

Martín Alonso López López

Cartago 2011

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO CON VIAJERO
AUTOPROPULSADO EN FINCA MONA, COMPAÑÍA PALMA TICA,
QUEPOS.

Martín Alonso López López

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

Ing. Marvin Villalobos Araya

Asesor -. Lector
Agrícola

Ing. Milton Solórzano Quintana

Director Escuela de Ingeniería
Tecnológico de Costa Rica

Cartago, Costa Rica

2011

Dedicatoria

Dedico de manera especial a mi madre Petrona López Lara, por brindarme la oportunidad de estudiar en una gran universidad y por su gran apoyo para que lograra sacar mi carrera.

Agradecimiento

Agradezco a Dios todo poderoso por darme la oportunidad de terminar manera satisfactoria mis estudios.

Un sincero agradecimiento a los profesores de la Escuela de Ingeniería Agrícola, porque son personas que comprenden al estudiante y dan todo su esfuerzo por ayudarlo, en especial a los Ingenieros Luis Obando, Marvin Villalobos Araya, Adrian Chavarría, Milton Solórzano, Máximo Villón y Armando Alvarado.

Agradezco infinitamente a todo el personal del Departamento de Ingeniería y al Departamento de Investigación de la Compañía Palma Tica por haberme dado la oportunidad de complementar mis estudios en sus instalaciones. Toda su experiencia laboral colaboró en la culminación de mi proyecto de graduación.

Además, agradezco a mis amigos, por estar en las buenas y en las malas dándome su apoyo.

Índice de Contenidos

Dedicatoria	i
Agradecimiento	ii
Índice de Contenidos	iii
Índice de Cuadros	vii
Índice de Figuras	ix
Abstrac.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 El suelo.....	5
2.2 Características y propiedades físicas del suelo	6
2.2.1 Textura de los suelos	6
2.2.2 Estructura del suelo	12
2.2.3 Porosidad de los suelos	13
2.2.4 Peso específicos aparentes de los suelos	14
2.2.5 Peso específico real de suelos	15
2.2.6 Infiltración del agua en el suelo	16
2.2.7 Potencial hídrico del suelo	22
2.2.8 Formas de agua en el suelo	23
2.2.9 Coeficiente hídrico del suelo.....	24
2.2.10 Disponibilidad de agua en el suelo.....	27
2.2.11 Porcentaje de agotamiento permisible	29
2.2.12 Profundidad	29
2.2.12 Productividad del suelo	32
2.3 Necesidades de agua en los cultivos	32
2.3.1 Transpiración.....	33

2.3.2	Evaporación.....	33
2.3.3	Evapotranspiración.....	33
2.3.4	Factores que afectan la evapotranspiración.....	34
2.3.5	Medición de la evapotranspiración	35
2.3.6	Evapotranspiración potencial (ET _o)	36
2.3.7	Coefficiente del cultivo	36
2.4	Requerimiento de riego	37
2.4.1	Láminas de riego	38
2.4.2	Lámina máxima de riego.....	39
2.4.3	Lámina neta o dosis neta de agua.....	39
2.4.4	Lámina bruta	40
2.4.5	Frecuencia o intervalo de riego	41
2.4.6	Cálculo del número de riego	41
2.4.7	Velocidad de avance del cañón	41
2.7.8	Tiempo de riego	42
2.5	Riego por aspersión y sus componentes.....	43
2.5.1	Fuente de agua.....	44
2.5.2	Tuberías y Accesorios	44
2.5.6	Seleccionar el aspersor	50
2.5.7	Distribución de las tuberías	53
2.6	Datos necesarios para el diseño hidráulico	53
2.6.1	Plano topográfico	53
2.6.2	Condiciones de la zona.....	53
2.6.3	Números de posiciones del lateral por días.....	54
2.6.4	Calculo del caudal para regar el área propuesta.....	54
2.6.5	Pérdidas por fricción en la tubería	55

2.6.6 Pérdidas en accesorios.....	56
2.6.7 Diámetro de la tubería del lateral	57
2.6.8 Pérdidas admisibles según el lateral.....	58
2.6.9 Lateral colocado a nivel	58
2.6.10 Lateral colocado hacia arriba	58
2.6.11 Lateral colocado hacia abajo	58
2.6.12 Calculo de la presión en la entrada de la bomba.....	58
2.6.13 Combinación de diámetro en tuberías sin salidas múltiples	59
2.6.14 Calculo del diámetro de la tubería principal	60
2.6.15 Método de la carga unitaria.....	61
2.6.16 Método de velocidad permisible	61
2.6.17 Método del porcentaje de presión	62
2.6.18 Cálculo del sistema de bombeo.....	62
III. METODOLOGÍA	63
3.1 Características generales y levantamiento topográfico	64
3.2 Diseño agronómico	65
3.2.1 Análisis físicos del suelo.....	65
3.2.2 Datos meteorológicos.....	66
3.3 Trazo de la tubería en el campo	68
3.4 Diseño hidráulico	68
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	70
4.1 Características generales y levantamiento topográfico	71
4.2 Diseño agronómico	73
4.3 Trazo de la tubería en el campo	86
4.4 Diseño hidráulico	91
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97

VI. BIBLIOGRAFÍA99

Índice de Cuadros

Cuadro 2.1. Consideraciones prácticas para textura y disponibilidad.....	11
de agua al tacto	11
Cuadro 2.2. Velocidad de infiltración del agua según la textura del suelo.	17
Cuadro 2.3. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente para diferentes texturas.	27
Cuadro 2:4. Propiedades físicas de distintos tipos de suelo	29
Cuadro 2.5. Eficiencias de riego estimadas en función del método de riego.	40
Cuadro 2.6. Diámetros en tuberías de aluminio.	45
Cuadro 2.7. Factor de reducción de infiltración.	50
Cuadro 2.8. Espaciamiento de un cañón en función del viento.....	51
Cuadro 2.9. Separación entre aspersores en función del viento y el espaciamiento adoptado.	51
Cuadro 2.10 Coeficiente de Uniformidad y Eficiencia de aplicación en función de la velocidad del viento.	52
Cuadro 2.11. Coeficiente de Hazen Williams según el material.	56
Cuadro 2.12. Factor m según el material tipo de material.....	56
Cuadro 2.13. Pérdidas locales por accesorios.	57
Cuadro 4.1. Valores obtenidos con ollas de presión.	79
Cuadro 4.2. Porcentaje de humedad con base a suelo seco.....	79
Cuadro 4.3. Datos obtenidos con la prueba de Bouyoucos.	80
Cuadro 4.4. Datos del peso específico en el suelo de la Zona 1 y Zona 2.	80
Cuadro 4.5: Valores de lámina neta.	81
Cuadro 4.6. Datos de infiltración en la Zona 1.....	82
Cuadro 4.7. Datos de infiltración en la Zona 2.....	83
Cuadro 4.8: Ecuaciones de infiltración e infiltración básica.	85
Cuadro 4.9. Resumen de los valores para el diseño.	85

Cuadro 4.10: Materiales para del sistema de riego.....95

Índice de Figuras

Figura 2.1. Horizontes que se pueden presentar en los suelos.	5
Figura 2.2. Triángulo de textura que muestra los límites de arena, limo y arcillas.	10
Figura 2.3. Clases de estructuras de los suelos.	13
Figura 2.4. Movimiento del agua en un suelo Franco arcilloso después de un riego.	16
Figura 2.5: Forma en que se representa la infiltración instantánea e infiltración acumulada.	19
Figura 2.6. Cilindros infiltrómetros ubicados en el campo.	21
Figura 2.7. Dimensiones, instalación y toma de datos de los cilindros infiltrómetros.	22
Figura 2.8. Profundidad del sistema radicular.	30
Figura 2.9. Agua consumida por las plantas.	31
Figura 2.10. Raíces de la palma aceitera.	32
Figura 2.11. Factores que influyen en las necesidades de agua de los cultivos.	35
Figura 2.12. Tubos de aluminio de 6 pulgadas (0,1524 m) y 9 metros de longitud.	45
Figura 2.13. Aspersor de impacto y sus componentes.	46
Figura 2.14. Aspersor tipo cañón.	48
Figura 2.15. Combinación de diámetros.	60
Figura 3.1. GPS submétrico.	64
Figura 3.2. Ollas de presión para determinar CC y PMP.	65
Figura 3.3 Cilindros infiltrómetros.	67
Figura 3.4. Distanciómetro láser.	68
Figura 4.1. Características del área que se va a regar.	71
Figura 4.2. Canal de riego que pasa por el área de estudio.	72
Figura 4.3. Delimitación del área de estudio.	72

Figura 4.4. Plano a curvas de nivel.....	73
Figura 4.5: Zona 1 donde se realizaron las calicatas 1 y 2.	74
Figura 4.6. Esquema de cómo se hicieron las calicatas en la Zona 1.....	74
Figura 4.7. Capas del suelo en la zona 1.	75
Figura 4.8. Esquema del comportamiento de las raíces en el área.	76
Figura 4.9. Desarrollo radicular en la Zona 1.....	76
Figura 4.10. Zona 2 donde se hicieron las calicatas 3 y 4.	77
Figura 4.11. Capas del suelo en la Zona 2.....	77
Figura 4.12. Comportamiento de las raíces.	78
Figura 4.13. Presencia de rocas en la Zona 2.	78
Figura 4.14. Curva de infiltración instantánea en la Zona 1.	82
Figura 4.15. Curva de infiltración acumulada de la Zona 1.	83
Figura 4.15. Curva de infiltración instantánea en la Zona 2.	84
Figura 4.16. Curva de infiltración instantánea en la Zona 2.	84
Figura 4.17. Catálogo seleccionado para escoger en sistema de riego.....	86
Figura 4.18. Lomos que pueden afectar el riego.	87
Figura 4.19. Perfil de la limitante 1 en el lote 157.	87
Figura 4.20. Perfil de la limitante 4 el lote 157.....	88
Figura 4.21. Escenario teórico si se coloca el sistema de riego presurizado.....	89
Figura 4.22. Ubicación espacial de la tubería.....	89
Figura 4.22. Esquema de la tubería vista en planta.	90
Figura 4.23. Perfil de la tubería.	90
Figura 4.24: Trazo de la tubería en el terreno.	91
Figura 4.25: Escenario teórico del cañón regando a 360°.	93
Figura 4.26: Colocación de la tubería en el campo.	94
Figura 4.27: Esquema del sistema de riego.	95

Figura 28. Equipo de riego seleccionado	95
---	----

Resumen

El proyecto se realizó en la compañía Palma Tica. El mismo consistió en diseñar un sistema de riego autopropulsado capaz de regar un terreno con pendientes fuertes y con una altura máxima de 30 m con respecto al nivel de referencia, que es la fuente de agua.

Lo primero que se hizo fue hacer un levantamiento del terreno para tener cuotas del área, ver obstáculos y hacer el trazo de las tuberías, para así tener una mejor idea del comportamiento del sistema de riego. El levantamiento se hizo mediante GPS, GPS submétrico y un distanciómetro.

Posteriormente, se sacaron muestras de suelo en el campo para llevarlas al laboratorio y obtener datos de punto de marchitez permanente, capacidad de campo, así como la estructura del suelo y peso específico. También, en el campo se midió la velocidad de infiltración mediante cilindros infiltrómetros para obtener la infiltración básica. Con la información de las características físicas del suelo y datos de condiciones climáticas de la zona se completó el diseño agronómico.

Una vez realizado el diseño agronómico, se llevó a cabo el diseño hidráulico, para un sistema de cañón móvil. Con el diseño se logra regar las 110 000 m² en 22 horas, con una velocidad de avance de 40 km/h y una frecuencia de riego de 7 días. Además, se ocupan 443 metros de tubería de 127 mm y una bomba de 82 CV para hacer que funcione todo el sistema.

Palabras claves: Diseño, riego, aspersión, lámina de agua, diseño agronómico, diseño hidráulico, tubería y bomba.

Abstrac

The project was held in Palma Tica's company. The same was to design a mobile irrigation system capable of irrigating land with steep slopes and with a maximum height of 30 m above the reference level.

The first thing we did was make a topographic survey to have quotas in the area, see obstacles, draw the pipe line and have a better idea of the behavior of the irrigation system, the topographic survey was done with GPS, GPS submeter and Laser distancemeters.

Subsequently, soil samples were taken in the field to bring them to the lab and get data about permanent wilting point, field capacity and soil structure and specific weight. Also, the infiltration speed was measured with infiltrometer. With the information from the physical characteristic of soil and climatic condition was done the agronomic design.

With the Agronomic design completed was carried out hydraulic design for a mobile irrigation. With the design is achieved irrigate 110 000 m² in 22 hours; with a forward speed of 40 km / h and an irrigation frequency of 7 days for get a irrigation depth of 22, 86 mm. In addition, dealing 443 meters of pipe of 127 mm of diameter and a pump of 82 CV to make it work throughout the system.

Keywords: Design, irrigation, sprinkler, water depth, agronomic design, hydraulic design.

I. INTRODUCCIÓN

En la zona del pacífico central de Costa Rica uno de los cultivos predominantes es la palma aceitera. Existen alrededor de 13 000 hectáreas propiedad de la compañía Palma Tica, en su mayoría, y de productores independientes.

Nuestro país se caracteriza por tener dos estaciones, una lluviosa y una seca. En la época seca se presenta un déficit hídrico que puede prolongarse por varios meses. Durante estos días las plantas pueden disminuir su producción por la falta de agua, esto representa importantes pérdidas para la empresa, que se dedica a explotar este tipo de cultivo.

De acuerdo a lo anterior, es importante suministrar la de cantidad agua que requiere el cultivo. Además, existen zonas que por sus condiciones topográficas es difícil conducir el agua para el riego de los cultivos, por lo que, en estos terrenos no se ha diseñado un método de riego que conduzca el agua durante la estación seca. Estas son áreas que se caracterizan por tener pendientes fuertes y de baja productividad, en la compañía se le conocen como lomas.

Por lo tanto, el objetivo general es diseñar un sistema de riego presurizado que sea móvil y autopropulsado, capaz de conducir el agua hasta la zona cultivada, para ello se necesita determinar las características topográficas de la zona donde se va realizar el proyecto. También, obtener las características físicas del suelo y datos meteorológicos, con el fin de realizar el diseño agronómico de la parcela donde se implementó el cultivo. Además, se debe hacer el diseño hidráulico que requiere el sistema de riego seleccionado y que sea capaz de regar el área en el menor tiempo posible. Igualmente, se debe hacer un análisis económico del diseño.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El suelo

Existen criterios generales que deben tomarse en cuenta para el diseño de un sistema de riego. Por ejemplo, se deben considerar los aspectos agronómicos para saber cuánta agua aplicar en el suelo y el tiempo durante el cual se debe aplicar, con el fin de colocar la lámina necesaria para que el cultivo se desarrolle (pero sin que exista desperdicio de agua) (http://www.siar.cl/docs/conceptos_riego_presurizado.pdf).

El suelo está conformado por capas, las cuales tienen diferentes características, estas capas u horizontes como se le conoce, son identificadas con la letra O, A, E, B, C y D). Cada horizonte tiene características y propiedades físicas, químicas y biológicas diferentes. Por esta razón, cuando se desarrolla un sistema de riego es importante diferenciar los horizontes para obtener datos que ayuden a distribuir la cantidad de agua que requieren las plantas. Los horizontes del suelo se muestran en la Figura 2.1

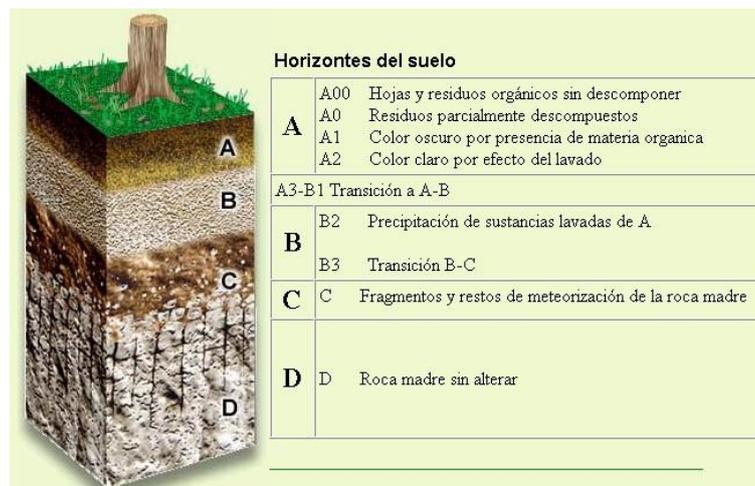


Figura 2.1. Horizontes que se pueden presentar en los suelos.

Fuente: <http://colegiociencias.webnode.es/quimica/i%C2%BA%20medio/materias/unidad%20n%C2%BA%204%3A%20los%20suelos/>

Las capas de los suelos se pueden caracterizar por sus colores, presencia de materia orgánica y minerales, además puede haber presencia de rocas cementadas, rocas duras y frágiles o presencia de rocas meteorizadas (es la desintegración y descomposición de una roca en la superficie terrestre o próxima a ella) que han sido afectada por las condiciones atmosféricas, químicas y biológicas en el suelo (presencia de raíces, insectos y roedores).

2.2 Características y propiedades físicas del suelo

El suelo es un reservorio que almacena agua y nutrientes para que las plantas se desarrollen, además les sirve de anclaje. Sin embargo, no todos se comportan de igual forma.

Analizando lo anterior, se puede pensar que para una comprensión del suelo es necesario hacer una serie de estudios que proporcionen datos confiables, si lo que se requiere es implementar un sistema de riego. Esto debido a que el agua se mueve a través de los horizontes a diferentes velocidades y profundidades, y la fuerza con que se retiene depende de sus características físicas.

2.2.1 Textura de los suelos

Las partículas del suelo han sido divididas en grupos basándose en su tamaño, a estos tres grupos se le conoce como fracciones del suelo, de acuerdo a Illescas (2007).

Valverde (2000), se refiere a los tres diferentes tamaños de partículas primarias del suelo, arena (0,02 - 2,0 mm), limo (0,002 - 0,02 mm) y arcilla (< 0,002 mm). De acuerdo con Núñez (1996), en la práctica el cálculo de la textura es usado como indicador básico de las propiedades físicas y químicas del suelo.

La textura del suelo tiene un gran efecto sobre la capacidad de retención del agua, dado a que el agua es retenida en forma de película sobre la superficie de las partículas y en los pequeños poros existentes entre ellas. Por tanto, los suelos con textura fina que tienen un gran número de partículas con gran superficie total y que tienen un elevado volumen de pequeños poros distribuidos entre las partículas, presentan una elevada retención de agua. Al contrario suceda con los suelos de textura gruesa, donde no se presentan altos niveles de retención. Por lo anterior, la capacidad de agua disponible en el suelo puede ser correlacionado con los contenidos de arcilla y limo. También puede ser un indicador de la infiltración y de la susceptibilidad a la erosión.

Todo lo anterior, a su vez determina considerablemente la cantidad de agua que debe ser aplicada durante el riego, la frecuencia, el tiempo de riego y el método más adecuado.

De acuerdo con Valverde (2000), para determinar la textura se utilizan dos métodos: el primero consiste en obtener muestras de suelo, llevarlas al laboratorio y aplicarles la técnica de la pipeta y el hidrómetro de Bouyoucos. Por otra parte, el segundo método es el que se hace en el campo, conocido como método del tacto, el cual consiste en manipular y presionar con los dedos una muestra de suelo para una estimación bastante aproximada de la textura.

El método del Bouyoucos se basa en la ley de Stokes y consiste en calcular la cantidad de sólido en suspensión a determinados intervalos de tiempo; la densidad se mide con el densímetro conocido como hidrómetro de Bouyoucos. Núñez (1996), indica en forma general que esta ley se basa en la velocidad diferencial de sedimentación de las partículas, con base en su tamaño, peso y medio en que sedimentan. Se emplea un hidrómetro “especialmente calibrado”, en lugar de la pipeta. La calibración especial se requiere porque conforme las partículas se sedimentan, el hidrómetro cambia “su línea de flotación” y no flota a una profundidad fija. El hidrómetro mide los gramos de sólidos en suspensión por litro de agua, en una escala de 0 - 60 gramos por litro, con intervalos numerados de 5 en 5 gramos por litro, e intervalos no numerados, pero que se indican en rayas horizontales, de 1 gramo por litro.

En el método de Bouyoucos, la sedimentación de las partículas de arena con diferentes tamaños (como arena fina y arena media, limo y arcilla) ocurren a diferentes tiempos. Durante el proceso se mide la cantidad de sólidos en suspensión, con el hidrómetro. La escala del hidrómetro indica cantidad de gramos en suspensión por litro de agua, a una temperatura específica de 19, 4 °C. La variación de la temperatura afecta la viscosidad del agua, lo que influye en la velocidad de sedimentación. Debido a lo anterior, es que se utilizan tablas de corrección.

En la determinación con el método de Bouyoucos se requiere tamizar la muestra con un tamiz número 10 ASTM con abertura de 2 mm. Luego se procede a realizar un tratamiento previo de la muestra para garantizar su dispersión. Como las partículas texturales se mantienen unidas por su interacción electrostáticas, más un conjunto de sustancia que las mantienen juntas, como compuestos orgánicos e inorgánicos, carbonatos, yeso y óxido e hidróxidos de hierro y aluminio; se utilizan tratamientos

químicos para remover o reducir estas sustancias cohesivas y garantizar que las partículas se comporten individualmente.

En el método de Bouyoucos se deben seguir los siguientes pasos: primero se debe verificar si la muestra de suelo contiene materia orgánica, si tiene destrúyala antes con peróxido de hidrógeno al 30% y calentando 20 - 30 minutos. Luego se debe agregar agua que cubra el suelo 1 cm. Una vez hecho se le debe agregar 5 ml de H₂O₂.

Repita la dosis de peróxido hasta que cese la efervescencia. Filtre el suelo y lávelo con agua destilada 3 veces. Seque el suelo por 24 horas. Esto se hace con suelos que tengan 5 % de materia orgánica, generalmente la materia orgánica está incluida en el análisis del hidrómetro, si es menor al 5%.

Se utiliza una muestra de suelo de 40 gramos seca con anterioridad en la estufa por 24 horas a 110°C y libre de materia orgánica. Luego se pulveriza la muestra y se tamiza en un tamiz de 2 mm. Se coloca en un dispersador. Se agrega 15 ml de hexametáfosfato de sodio y 250 cc de agua. Se coloque la muestra en el agitador mecánico y agite por 15 minutos. Se transfiere a un cilindro de Bouyoucos, llene con agua destilada hasta la marca inferior de un litro, introduzca el hidrómetro en el contenido y siga llenando el cilindro de Bouyoucos hasta la marca donde dice 1000 ml. Se saca el hidrómetro, tapar el cilindro y agitar la suspensión vigorosamente. Colocar el cilindro en la mesa de trabajo y tomar el tiempo. A los 20 segundos se debe insertar el hidrómetro cuidadosamente de tal manera que quede estable y no quede en un subir y bajar dentro del cilindro; a los 40 segundos lea y anote la lectura. Tome la temperatura inmediatamente después de leer con el hidrómetro. Si se forman espumas agregue 3 ó 4 gotas de alcohol amílico para facilitar la lectura. Por cada grado arriba de 19, 4°C, agregue 0,3 a la lectura para la corrección respectiva. Calcule el porcentaje de arena en la muestra. El hidrómetro está calibrado para dar la lectura de los gramos de materia de suelo en suspensión en el litro con el hidrómetro incluido y de tal forma que en suelos con 5% de materia orgánica o menores se consideran que ya va incluida en el análisis del hidrómetro.

La arena se deposita en el fondo a los 40 segundos, por lo tanto la lectura del hidrómetro a los 40 segundo corregida por la temperatura respectiva, da la cantidad del

limo y arcilla en suspensión, por ello se calcula el porcentaje de arena que ya se encuentra sedimentada. Para calcular el porcentaje de material en suspensión (%MS) se hace mediante la ecuación 1:

$$\%MS = \frac{\text{Lec,hidro,40}'' \times 100}{\text{Peso muestra}} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

%MS= material en suspensión (%)

Lec,hidro,40'' = lectura del hidrómetro a los 40 segundos.

Pm = peso de la muestra (g)

Cuando se haya calculado el porcentaje de material en suspensión a los 40 segundos se calcula el porcentaje de arenas totales con la ecuación 2:

$$\%At = 100 - \%MS \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

%At = porcentaje de arena totales (%)

%MS = porcentaje del material en suspensión (%)

Una vez que se obtenga el porcentaje de arena totales, posteriormente tomar la lectura a las dos horas, introduzca el hidrómetro antes de hacer la lectura a este tiempo. Calcule el porcentaje de arcilla de la muestra. Se supone que al final de dos horas el limo y la arena han sedimentado. La lectura corregida por temperatura del hidrómetro al final de dos horas representa los gramos de arcilla en la muestra. Para calcular el porcentaje de arcilla coloidal se hace con la ecuación 3:

$$\%AC = \frac{\text{Lec,hidro,120}'' \times 100}{Pm} \dots\dots\dots, (3)$$

Donde:

%Ac= arcilla coloidal (%)

Lec,hidro,120''= lectura del hidrómetro a los 40 segundos,

Pm= peso de la muestra (g)

Una vez que se haya calculado el porcentaje de arcilla coloidal se calcula el porcentaje de limo de la muestra mediante la ecuación 4:

$$\%L = 100 - (\%At - \%Ac) \dots \dots \dots (4)$$

Donde

%L= porcentaje de limo (%)

%Ac= arcilla coloidal (%)

%At= porcentaje de arena totales (%)

Con los porcentajes de arena, limo y arcilla, se determina el nombre textural del suelo por medio del triángulo de textura. La textura se puede determinar trazando líneas paralelas a la base del triángulo, El punto donde se intersecan las líneas dentro del triángulo textural da la clase o textura del suelo. El triángulo de textura que se muestra en la Figura 2.2:

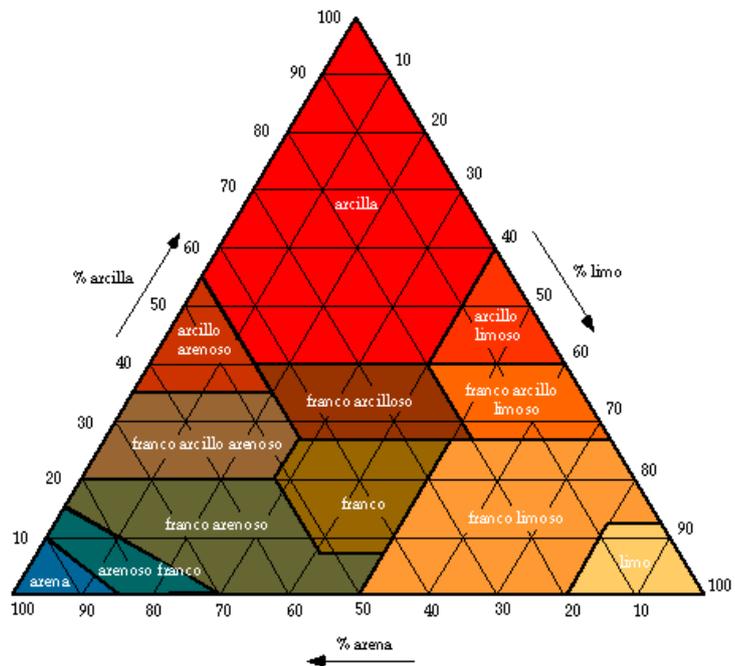


Figura 2.2. Triángulo de textura que muestra los límites de arena, limo y arcillas.

Fuente: <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/text.htm>

Para el método del tacto se puede utilizar el Cuadro 2.1, que es una guía con las consideraciones prácticas para determinar la textura y simultáneamente, su contenido de humedad:

Cuadro 2.1. Consideraciones prácticas para textura y disponibilidad de agua al tacto

Humedad fácilmente similar en %	Textura		
	Arenosa	Media	Arcilla
0 - 25	seco, suelto, escurre en dedos	se deshace en polvo	Duro, seco, apretado, difícil deshacer
25 - 50	Seco, no forma bolas al comprimir	Migajoso, pero compacto al comprimir	Moldeable, se puede formar bolitas
50 - 75	Puede formar bolitas, pero no se mantiene	Forma bolitas dócil, algo pegajosa al comprimir	Forma bolitas o cilindros al comprimir con los dedos
75 - 100	Puede formar bolitas, pero se rompen fácilmente, no se adhiere a la mano	Forma bolita moldeable, se alisa y es algo pegajosa	Forma cilindros con facilidad, es pegajoso
100	Al comprimir no desprende agua, pero se adhiere a la mano	Al comprimir no sale agua, pero queda huella en la mano	Al comprimir no sale agua, pero queda huella en la mano
Riego	Retiene poco agua y el riego debe ser continuo	Más apta para riego, retiene agua en cantidades adecuadas,	Retiene mucha agua, pero poco disponible para las plantas

Fuente: Valverde (2000)

2.2.2 Estructura del suelo

Es el término que se utiliza para la agregación de partículas del suelo (arena, limo y arcilla) en grupos de partículas primarias, las cuales están separadas de los agregados adyacentes por superficie de ruptura. De acuerdo con Valverde (2000), la estructura del suelo es la característica de los suelos para poder agrupar y estabilizar las partículas primarias. Se refiere a las diferentes formas que pueden adoptar las partículas, formando agregados o terrones, gracias a la unión de partículas gruesas que actúan como armazón y las finas que actúan como agentes cementantes. La estructura se relaciona con la capacidad de laboreo del suelo, permeabilidad, aireación y penetración de las raíces.

Las diferentes clases de estructuras presentes en un suelo son:

- a. Granular: agregados pequeños, redondos, duros, algo porosos.
- b. Columnar: forma de columna, sin arista.
- c. Migajosa: agregados pequeños, débiles, muy poco porosos.
- d. Laminar: agregados planos, láminas superpuestas.
- e. Bloques: bloques limitados por otros agregados, caras angulares definidas.
- f. Prismáticas: forma de prisma con arista.

La estructura laminar y masiva tienen un movimiento del agua muy lento que puede llegar a limitar el uso de métodos de riego como el de aspersión por producir encharcamiento, siendo difícil la aplicación del riego. Las estructuras en bloques y prismáticas tienen movimiento del agua moderado, mientras que la granular tiene un movimiento rápido, no presentando normalmente problemas de riego ni drenaje y siendo estos tres tipos de estructuras las más favorables para la relación de agua-suelo-planta.

La estructura más conveniente, desde el punto de vista de la aptitud agrícola de los suelos, es la migajosa por su alta porosidad, aunque es aceptable la granular y la de bloques.

En la Figura 2.3 se muestran algunos ejemplos de estructuras existentes en el suelo:

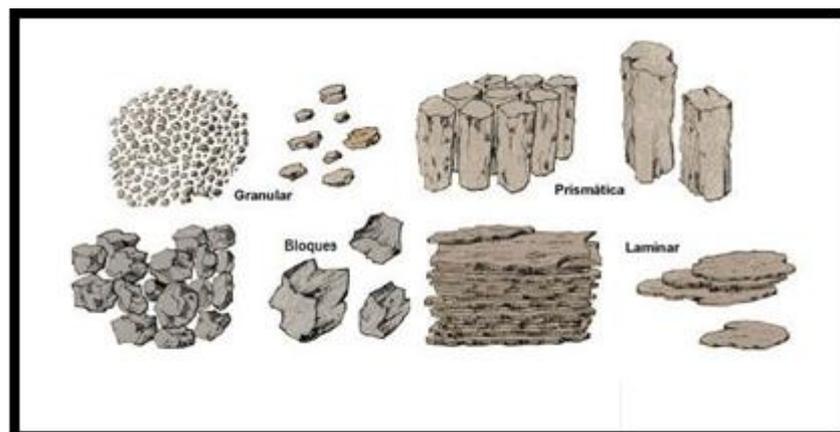


Figura 2.3. Clases de estructuras de los suelos.

Fuente: Núñez (2000)

La importancia que tiene el conocimiento de la estructura del suelo en riego es porque afecta básicamente la velocidad de infiltración del agua, característica que es determinante en el cálculo del tiempo necesario para aplicar una lámina de riego. El movimiento del agua dentro del suelo es también afectado por la estructura, siendo esto importante en el drenaje agrícola. Otro aspecto agronómico afectado es la profundidad de penetración de las raíces, las cuales tienen relación con la profundidad a regar o drenar, Illescas (2007).

2.2.3 Porosidad de los suelos

Se refiere al porcentaje de volumen de suelo ocupado por poros o espacios vacíos, con respecto al volumen total.

La porosidad afecta directamente la permeabilidad (movimiento interna del agua en el suelo), la aireación (contenido de aire en el suelo) y la capacidad de retención del agua del suelo.

En función del tamaño de los poros, la porosidad se divide en capilar y no capilar. La primera está formada por microporos que retienen fuertemente el agua y la segunda formada por macroporos que facilitan su movimiento. Para una buena aireación y desarrollo de los cultivos debe existir al menos un 10% de porosidad no capilar. Al conjunto de macro y microporos se le denomina porosidad total, la cual depende de la textura y estructura del suelo.

Normalmente el valor de la porosidad para arena, oscila entre un 30% y un 40%; para arcillas de un 40% a un 65% y para suelos francos de un 40% a un 50%. La porosidad no capilar es muy baja en arcillas y aumenta conforme el suelo es más arenoso. Esto quiere decir, que en suelos arcillosos predomina la microporosidad y en suelos arenosos la macroporosidad.

Para el calcular la porosidad total se puede utilizar la ecuación 5:

$$\%P_r = 1 - \frac{P_{ap}}{P_{real}} \times 100 \dots \dots \dots (5)$$

En donde:

%Pr= Porosidad (%)

Pap= Peso específico aparente (g/cm³)

Preal= Peso específico real (g/cm³)

2.2.4 Peso específicos aparentes de los suelos

Es la características que se refiere a la relación entre el peso de un volumen de suelo seco en la estufa a 110°C durante 24 horas, incluyendo el espacio poroso, dividido entre el volumen igual al del agua. Se expresa en gramos por centímetros cúbicos.

Por definición, cuanto mayor sea el peso específico aparente de un suelo, es menor su espacio poroso. La determinación del peso específico de los suelos es básica para calcular la capacidad de retención de humedad del suelo, la lámina de riego por aplicar o la retenida después de un riego, la porosidad del suelo y la detección de capas compactas.

La ecuación 6 permite calcular el peso específico aparente:

$$P_{ap} = \frac{P_{ss}}{v_{total}} \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

Pap= Peso específico aparente (g/cm³)

Pss= Peso de suelo seco (g)

Vtotal= Volumen total (cm³)

Para obtener el peso específico aparente, se debe obtener una muestra de suelo a la profundidad deseada, mediante cilindros especiales que tienen un extremo afilado, el que se coloca sobre el perfil del suelo, de tal modo que por el otro extremo se pueda golpear para poder introducirlo. Se seca la muestra en el horno por el procedimiento estándar.

El volumen total se refiere a la cantidad de suelo más el espacio poroso, este se obtiene conociendo las dimensiones del cilindro con que se extrajo las muestras, por esta razón la muestra no debe ser disturbada y se calcula con la ecuación 7:

$$V_{\text{total}} = \frac{\pi \times D^2 \times h}{4} \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

Vtotal= Volumen total (cm³)

D = Diámetro del cilindro (cm)

h= Altura del cilindro en (cm)

2.2.5 Peso específico real de suelos

Se refiere a la relación entre el peso de muestra de suelo seco y su volumen; y no incluye el espacio poroso, esto según Valverde (2000).

Illescas (2007), indica que el peso específico real de los suelos minerales varía aproximadamente de 2,55 a 2,7 g/cm³ tomándose un valor promedio de 2,65 g/cm³, El peso específico real para fines de riego y drenaje de tierras agrícolas es suficiente asumir su valor promedio.

El peso específico, tanto aparente como real se debe determinar para cada capa del perfil del suelo, máxime si las capas presentan diferentes texturas.

2.2.6 Infiltración del agua en el suelo

Después de un riego o lluvia, el agua penetra en un suelo en forma vertical y horizontal por efecto de la gravedad, a este fenómeno se le conoce como infiltración (Valverde, 2000).

De acuerdo con Valverde (2000), la velocidad de infiltración se refiere a la relación entre una lámina de agua que se infiltra y el tiempo que tarde en hacerlo se expresa en centímetros por hora (cm/h) o milímetros por hora (mm/h). El agua se acumula en los poros del suelo y así pasa a ser utilizada por las plantas, es afectada por la evaporación o es desplazada a otros lugares por efecto del drenaje o percolación.

La velocidad de infiltración con que el agua penetra en el suelo depende de varios factores, entre lo que se destacan principalmente la estructura y textura del suelo, el contenido de humedad del suelo, la compactación, la estratificación, lámina empleada para la prueba o riego, la temperatura del agua y el suelo, y el estado químico-físico del suelo (Illescas, 2007). En la Figura 2.4 se puede observar cómo se comporta el agua después de un riego o lluvia.

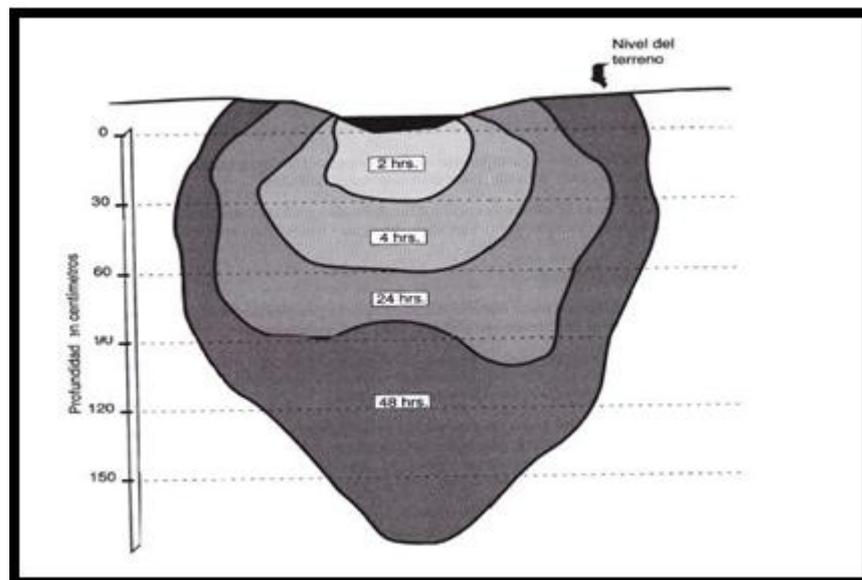


Figura 2.4. Movimiento del agua en un suelo Franco arcilloso después de un riego.

Fuente: Valverde (2000)

La determinación de la velocidad de infiltración de agua en los suelos es fundamental para calcular tiempo de riego, diseño de los sistemas de riego y los

caudales a manejar en las parcelas. Su determinación puede efectuarse en el laboratorio usando muestras alteradas. Pero se considera conveniente efectuarla con método de campo que no altere el estado natural del suelo.

La infiltración del suelo se puede expresar de diferentes formas:

- a. Infiltración instantánea o velocidad de infiltración: es la velocidad con que el suelo absorbe el agua en un momento determinado; disminuye con el tiempo hasta alcanzar un valor constante.
- b. Infiltración acumulada: es la lámina que se acumula en el suelo durante un tiempo; aumenta con el tiempo.
- c. Infiltración media: es la velocidad de infiltración durante un tiempo acumulado; disminuye con el tiempo.
- d. Infiltración básica: es la velocidad de infiltración cuando alcanza un valor constante. Se considera que se ha alcanzado cuando la disminución es del 10% en una hora.

Conforme la humedad penetra en el suelo y satura las capas superiores, su velocidad disminuye debido a la mayor resistencia del suelo y a la reducción en el diámetro de los poros hasta llegar a un valor constante denominado infiltración básica, que se utiliza para compararla con el tiempo de aplicación en el caso de ser un riego a presión.

En términos medios, la velocidad de infiltración presenta valores muy variables en el espacio y en el tiempo, siendo menor en texturas pesadas o arcillosas, como se aprecia en el Cuadro 2.2:

Cuadro 2.2. Velocidad de infiltración del agua según la textura del suelo.

Textura del suelo	Velocidad infiltración (mm/h)
Suelo arcilloso	1-5
suelo limoso	8-12
suelo arenoso	25-50

Fuente: Valverde (2000)

La velocidad de infiltración y la infiltración acumulada se puede estimar por medio de cilindros infiltrómetros. Los datos obtenidos se utilizan en el desarrollo de las ecuaciones empíricas, como la de Horton y la de Kostiakov- Lewis (Valverde, 2000).

Para Illescas (2007), estos son los modelos más usados por ajustarse muy bien a la mayoría de las condiciones de las prácticas de riego, El modelo se basa en que la velocidad de infiltración decrece con el tiempo este modelo se representada por la ecuación 8.

$$I_i = K \times t^n \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

I_i = Infiltración instantánea o Velocidad de infiltración (cm/h)

t = tiempo acumulado de infiltración (minutos)

K = parámetro que representa la velocidad de infiltración cuando el tiempo es en minutos

n = parámetro que indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo. Tiene valores en -1 y 0,

Para el cálculo de la infiltración acumulada, se integra la ecuación de Kostiakov, como se muestra en la ecuación 9:

$$\int_0^t I_i dt = \frac{K \times t^n}{60} dt \dots\dots\dots, (9)$$

Dando como resultado la ecuación 10:

$$I_{cum} = \frac{K}{(n+1) \times 60} \times t^{n+1} \dots\dots\dots (10)$$

Donde:

I_{cum} = Infiltración acumulada en (cm)

t = tiempo acumulado necesario para que se infiltre la lámina (minutos)

K y n = parámetro de la ecuación de Kostiakov- Lewis,

Si se representa gráficamente en función del tiempo la infiltración instantánea y la infiltración acumulada se representaría como la Figura 2.5:

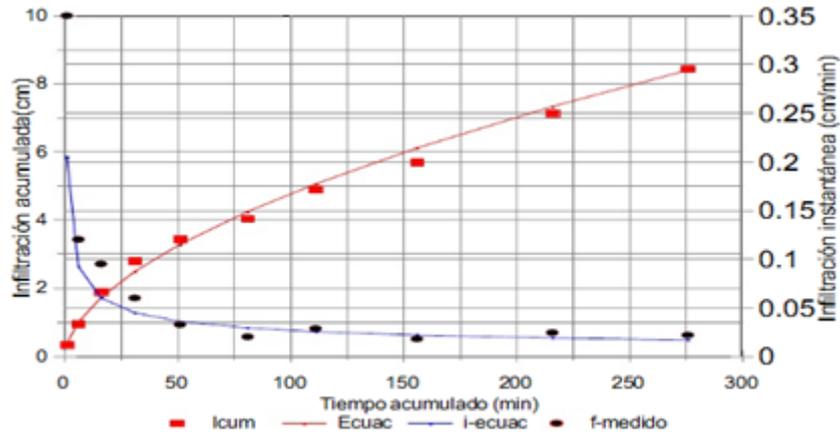


Figura 2.5: Forma en que se representa la infiltración instantánea e infiltración acumulada.

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/54405849/11/Ecuaciones-de-infiltracion>

Otra forma de considerar la infiltración básica es como el valor instantáneo cuando la velocidad de cambio de la infiltración para un período estándar es de 10% o menos de su valor, esto se puede deducir como se expresa la ecuación 11.

Para Villalobos (2008), es cuando el decremento de la infiltración instantánea es del 10% en una hora.

$$\frac{dI_i}{dt} = -0,1I_i \dots \dots \dots (11)$$

Si sustituimos ecuación 8 en la ecuación 11 obtenemos la ecuación 12

$$\frac{d(Kt^n)}{dt} = -0,1(Kt^n) \dots \dots \dots (12)$$

Si se deriva la ecuación 12 y se despeja “t” obtenemos la ecuación 13 que se expresa en horas, porque la infiltración instantánea está expresada en centímetros por hora (cm/h).

$$t_b = -10n \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

t_b = tiempo para alcanzar la infiltración básica (h),

Para determinar la infiltración básica se debe introducir el tiempo en que se alcanza esta infiltración en la ecuación de infiltración instantánea (ecuación 8), es necesario que el tiempo de infiltración básica esté en minutos para poder sustituirlo en la ecuación 8, para eso basta con multiplicarlo por 60 que es el factor de conversión de horas a minutos, así obtenemos la ecuación 14:

$$I_b = K(-600n)^n \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

I_b = Infiltración básica (cm/h)

K y n = parámetros obtenidos en la ecuación de Kostiakov- Lewis,

El cociente entre la infiltración acumulada y el tiempo correspondiente se denomina como tiempo promedio y se expresa en la ecuación 15:

$$I_p = \frac{I_{cum}}{t} \dots \dots \dots (15)$$

Si sustituimos la ecuación 10 en la ecuación 15 obtenemos la ecuación 16

$$I_p = \frac{K}{(n+1) \times 60} \times t^n \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

I_p = Infiltración promedio en cm

t = tiempo acumulado (minutos)

Uno de los principales datos obtenidos en la ecuación de Kostiakov- Lewis es calcular el tiempo necesario para que se infiltre la lámina de riego, o sea el tiempo que es necesario mantener el agua en el terreno para que se infiltre una lámina determinada (Illescas, 2007).

Es para poder emplear la ecuación de Kostiakov- Lewis debemos obtener valores de infiltración en el laboratorio o en el campo.

Según Valverde (2000), uno de los métodos más usados es el de los cilindros infiltrómetros que permite hacer determinaciones puntuales. Se requiere de dos cilindros metálicos, de 30 y 45 cm de diámetro y 45 cm de altura; el cilindro menor se introduce 10 cm en el suelo y se sobrepone el cilindro mayor en forma concéntrica y a la misma profundidad, con una regla graduada en centímetros, con el cero al nivel del suelo Para Illescas (2007) es el método más versátil y el más adecuado para diseñar, operar y evaluar sistemas de riego de inundación total y aspersión, esta método se puede apreciar en la Figura 2.6 y 2. 7:



Figura 2.6. Cilindros infiltrómetros ubicados en el campo.

Fuente: http://prensita.com/nota,asp?noticia_id=459

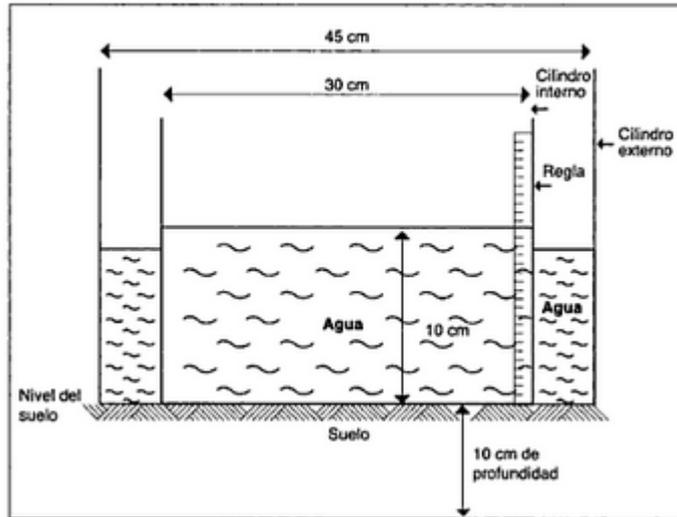


Figura 2.7. Dimensiones, instalación y toma de datos de los cilindros infiltrómetros.

Fuente: Valverde (2000)

2.2.7 Potencial hídrico del suelo

Esto permite saber si el agua se encuentra en equilibrio o movimiento, la relación y uso del agua por parte de la planta. La energía potencial del agua va a depender de la atracción de la fase sólida, de su concentración de sales y de la temperatura.

El potencial del agua es la suma de los potenciales parciales de la fuerza de la gravedad, fuerza de adsorción, la capilaridad y la presión atmosférica.

Para efectos de riego, los más importantes son el potencial matriz o capilar y el gravitacional (Valverde, 2000).

Sin embargo, existen otros potenciales como lo son el potencial osmótico que permite medir sales disueltas en el agua del suelo y el potencial de presión que es básico para efectos de drenaje.

El potencial matriz o capilar es una medida de la tenacidad con que el agua es retenida por el suelo y representa la fuerza por unidad de área que se debe aplicar para extraerla; el agua en el suelo es gobernada por la fuerza de adhesión y cohesión. La adhesión es la fuerza de atracción del suelo hacia las moléculas de agua; la cohesión es la atracción de las moléculas de agua entre sí.

El potencial gravitacional se debe a que el agua se mueve en forma vertical por efecto de la gravedad. Este potencial es mayor en suelos arenosos, lo que se pone de manifiesto por la forma alargada del bulbo húmedo que se crea por efecto del agua.

En un suelo seco el potencial del agua es negativo, porque no se necesita trabajo para transportar el agua, sino que el movimiento es espontáneo, mientras que para extraer agua del suelo, sí se necesita energía, pues el agua es retenida por las partículas; esa fuerza por unidad de área que se debe aplicar se conoce como tensión de la humedad del suelo.

En cuanto a la extracción del agua por parte de las plantas, es más interesante conocer la energía con que el agua es retenida, pues de nada sirve que un suelo contenga una gran cantidad de agua si las raíces de las plantas no son capaces de extraerla.

De acuerdo con Pascual (2008), el agua del suelo está sometida a una serie de factores que tienden a retenerla o expulsarla. El potencial hídrico del suelo puede considerarse como la cantidad de trabajo que es necesario aplicar para transportar reversible e isométricamente la unidad de masa de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto de suelo considerado. Puede medirse en términos de trabajo dividido por volumen (potencial de presión, expresado en bar o atmósfera; 1 bar = 0,987 atm), o dividido por peso (potencial de peso, expresado en unidades de longitud; 1 bar = 10,20 m de columna de agua).

Las unidades indicadas son prácticas cuando se tratan de tensiones altas; para facilitar el manejo de cifras muy bajas, se propuso un sistema para expresar la tensión como el logaritmo de la columna de agua en cm, conocida como pF.

2.2.8 Formas de agua en el suelo

En el suelo se encuentran tres tipos o formas de agua, que se identifican inmediatamente después de que se aplique un riego fuerte (Valverde, 2000). La primera se le conoce como agua gravitacional o superficial y no es aprovechable por las plantas.

La segunda, se da cuando el agua gravitacional ha drenado, y es cuando las partículas del suelo quedan envueltas por una lámina de agua que se mueve por fuerzas

capilares y puede ascender a alturas que dependen de la textura de ese suelo. Esta es conocida como agua capilar y es aprovechable casi en su totalidad por las plantas.

Si no llueve más o no se aplica riego y se permite que el agua capilar se reduzca a niveles en que el cultivo no puede absorberla, se llega al agua higroscópica. Esta se caracteriza porque es fuertemente retenida por las partículas de suelo y se mueven en forma de vapor.

2.2.9 Coeficiente hídrico del suelo

Es importante conocer el agua el agua aprovechable por las plantas para que a la hora del riego sólo se aplique lo que se ocupe.

El agua disponible en el suelo, para que la planta la consuma debe tener límites que depende de la textura (Valverde, 2000), como máximo las plantas dispone en el suelo de la humedad comprendida entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

El primer límite es capacidad de campo (CC) y se define como el contenido de humedad presente en un suelo en contra de las fuerzas de la gravedad, se da a dos o cuatro días después de una lluvia fuerte o un riego abundante y se da cuando ha drenado el agua gravitacional; depende de la textura, contenido de materia orgánica y compactación del suelo.

Para Illescas (2007), el concepto de capacidad de campo es de gran utilidad por ser el límite superior de agua aprovechable o disponible para el desarrollo de las plantas y además porque es el porcentaje de humedad al que la zona radicular debe regarse para que no existan desperdicios ni falta de agua a la planta.

Cuando se está en capacidad de campo, los poros grandes del suelo se llenan de aire, los microporos se encuentran llenos de agua y el movimiento del agua en el suelo es lento y debido a las fuerzas capilares principalmente. Después de aplicar un riego pesado o una lluvia fuerte hasta humedecer el perfil del suelo, el agua gravitacional tarda normalmente de 2 a 3 días para drenar, aunque el rango puede variar de pocas horas en suelos arenosos hasta 5 días o más en suelo muy arcilloso o con mal drenaje.

La retención se expresa en términos de tensión de humedad. La capacidad de campo es una constante características para cada tipo de suelo.

En un suelo arcilloso la capacidad de campo retiene el agua a una tensión de 1/3 de atmósfera, mientras que un suelo arenoso la retiene 1/10 de atmósfera. Esto significa que un suelo arcilloso retendrá más agua que uno arenoso, pero a tensiones tan altas que las plantas en crecimiento pueden llegar a marchitarse.

La determinación de la capacidad de campo se hace en laboratorio, con una olla de presión donde se somete una muestra de suelo saturada a una tensión de 3,33 metros de columna de agua (1/3 de atmósfera). Luego se determina la humedad por el método gravimétrico, el cual consiste en pesar una muestra de suelo húmedo, someterla a desecamiento en una estufa a 110°C por 24 horas y pesarla de nuevo para conocer el peso de suelo seco. La diferencia de peso es el contenido de humedad de la muestra.

El método con ollas de presión consiste en tomar muestras de suelo sin disturbar en el campo a la profundidad que se requiere, estas deben de ser de alrededor de 25 gramos. Las muestras se deben tomar con anillos. Estas se colocan en el plato de cerámica. Previamente el plato de cerámica debe estar saturado. En el plato de cerámica las muestras se dejan con un milímetro de agua durante 24 horas. Luego se extrae el sobrante de agua en los platos y se colocan en ollas de presión, cerrándola en forma hermética. Con los reguladores de presión se regula de tal forma de aplicar una presión a la olla de 0,33 atmósferas durante 48 horas. Después de este tiempo se extraen las muestras se pesan y luego se colocan en el horno y se secan a 105°C por 24 horas. Se determina la humedad gravimétrica con base a suelo seco, la que equivale a capacidad de campo y se expresa en la ecuación 17:

$$CC = \frac{PSH - PSS}{PSS} \times 100 \dots \dots \dots (17)$$

Donde

CC= capacidad de campo, en porcentaje con base a suelo seco %

PSH= peso de suelo húmedo (g)

PSS= peso de suelo seco (g)

Otra forma de determinar CC es mediante la textura del suelo, consiste en aplicar una fórmula en función del contenido de arena, limo y arcilla que presente el suelo. Éste método se debe de utilizar con cierta reserva, ya que además de los diferentes agregados del suelo, intervienen otros factores en la capacidad de retención como es el caso de contenido de materia orgánica (Villalobos, 2008). Con los porcentajes de arena, arcilla y limos se determina CC con la ecuación 18

$$CC = 0,6382 \times \%arcilla + 0,2845 \times \%limo + 0,0507 \times \%arena.....(18)$$

El segundo límite es Punto de Marchitez Permanente (PMP), que se define como el contenido de humedad retenido por las partículas de suelo que las plantas no pueden utilizar para satisfacer sus necesidades y recuperar la turgencia, lo que provoca una marchitez irreversible. El agua puede estar retenida en el suelo a una tensión entre 13 y 15 atmósferas, dependiendo de la velocidad de utilización del agua por la planta, del tipo de cultivo, textura del suelo y el contenido de sales en el suelo.

Las plantas pueden tomar agua lentamente a un cuando el suelo está más seco que PMP, pero solo para sobrevivir, no para desarrollarse y crear. Hay un contenido de humedad del suelo llamado “Punto último de marchitez”. Cuando el suelo alcanza este nivel de humedad la planta muere.

Para calcular el punto de marchitez permanente se sigue el mismo procedimiento que se utilizó para calcular capacidad de campo por medio de ollas de presión, pero se debe con una presión de 15 atmósferas, una vez hecho esto se determina la humedad por el método gravimétrico mediante la ecuación 19:

$$PMP = \frac{PSH-PSS}{PSS} \times 100..... (19)$$

Donde

PMP= Punto de marchitez permanente (%)

PSH= peso de suelo húmedo (g)

PSS= peso de suelo seco (g)

Otro método para calcular PMP es conociendo el tipo de textura y capacidad de campo y utilizando la ecuación 20:

$$PMP = 0,4897 \times CC + 1,1666 \dots \dots \dots (20)$$

Si no se cuenta con datos de campo, algo no recomendable, se puede estimar el punto de marchitez permanente y capacidad de campo mediante el Cuadro 2.3:

Cuadro 2.3. Capacidad de campo y punto de marchitez permanente para diferentes texturas.

textura del suelo	CC (%)	PMP (%)
Arenoso	6-12	2-6
Franco-arenoso	10-18	4-8
Franco	18-26	8-12
Franco-arcillosa	23-31	11-15
Arcilloso-arenoso	27-35	13-17
Arcilloso	31-39	15-19

Fuente: Illescas (2007)

2.2.10 Disponibilidad de agua en el suelo

Según Pascual (2008), de la simple observación de las condiciones naturales, se desprende el papel del suelo como regulador de la humedad. En efecto mientras la planta consume agua de una manera continua, la lluvia no cae sino de una manera intermitente; para conocer la capacidad de este depósito, así como el intervalo entre riegos, se necesita conocer la disposición de los horizontes en el perfil, el espesor y la textura y estructura de los mismos, junto con la velocidad de agotamiento.

Como ya se indicó, las plantas disponen en el suelo de la humedad comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

Para Valverde (2000), la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, determinada por la capacidad de campo y el punto de marchites permanente, es

conocida como agua disponible. Se expresa como porcentaje de peso de suelo seco. Se considera que CC el agua es 100% disponible y a punto de marchitez es de 0%.

Es de esta manera que el agua capilar, de la cual los cultivos si tienen disponibilidad, o sea la humedad aprovechable por las plantas es la diferencia entre el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, y puede ser expresada como un porcentaje de humedad de suelo, como se muestra en la ecuación 21:

$$\%H = CC - PMP \dots\dots\dots (21)$$

Donde

%H= humedad aprovechable (%)

CC= Capacidad de campo (%)

PMP= Punto de marchitez permanente (%)

Conocer la humedad del suelo en algún momento es de gran importancia para el riego porque permite establecer la frecuencia y de riego y la cantidad de agua durante cada riego.

En la práctica es normal aplicar el riego cuando una fracción de agua disponible ha sido agotada, concepto conocido como porcentaje de agotamiento permisible. Este parámetro se puede determinar para cada cultivo.

El agua disponible no es completamente aprovechable por las plantas. A medida que disminuye el contenido de humedad por efecto de la evapotranspiración, es mayor el esfuerzo que tiene que ejercer las raíces de las plantas para adsorber el agua.

En el Cuadro 2.4 se muestra un resumen de las propiedades físicas de diferentes suelos que se ha utilizado cuando no se dispone de datos laboratorios.

Cuadro 2:4. Propiedades físicas de distintos tipos de suelo

Textura del suelo	Densidad aparente (g/cm ³)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez permanente (%)
Arenoso	1,55 - 1,80	6 – 12	2 – 6
Franco-Arenoso	1,40 - 1,60	10 – 18	4 – 8
Franco	1,35 - 1,50	18 -26	8 – 12
Franco-Arcilloso	1,30 - 1,40	23- 31	11 – 15
Arcilloso – Arenoso	1,25 - 1,35	27 – 35	13 – 17
Arcilloso	1,20 - 1,30	31 – 39	15 – 19

Fuente: Illescas (2007)

2.2.11 Porcentaje de agotamiento permisible

Los cultivos presentan diferentes porcentajes de agotamiento permisible, que les permite tener un desarrollo y producción y se puede usar como herramienta de trabajo para un buen manejo del agua.

Los suelos con distinta textura poseen diferentes curvas de Potencial mátrico – humedad. Pascual (2008), apunta que en los suelos muy arenosos o con grava es recomendable regar cuando se ha agotado el 40 % del agua útil, el 50% en arenoso, 60% en francos y 66% en suelos arcillosos; o una regla práctica adecuada con fines de diseño es dejar que el agua aprovechable se agote en un 50%.

2.2.12 Profundidad

Es la distancia desde la superficie del suelo hacia abajo, hasta donde se puede desarrollar el sistema radicular sin condiciones restrictivas que lo afecte, esto se puede observar en la Figura 2.8:

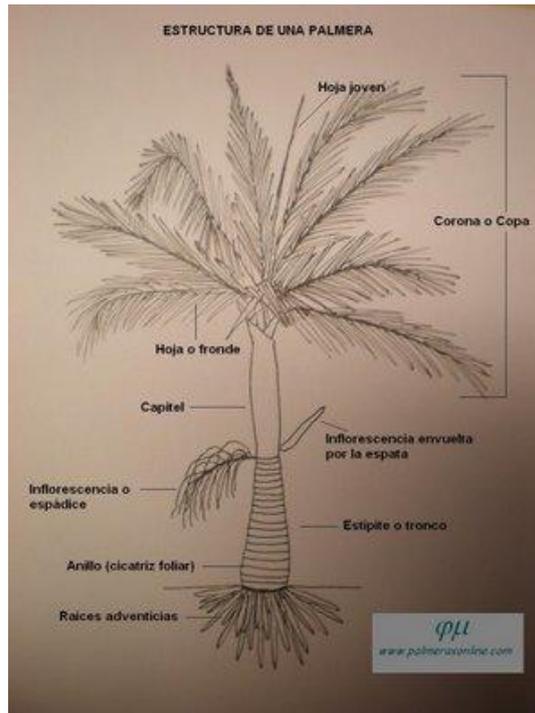


Figura 2.8. Profundidad del sistema radicular.

Para conocer el agua útil que contiene un suelo, es necesario tener en cuenta la profundidad del mismo y evidentemente esta profundidad debe corresponder a la de enraizamiento de la planta a cultivar.

En la Figura 2.9 se presenta el modelo típico de consumo de agua por parte de las plantas; se observa que si se divide la profundidad total de enraizamiento en cuatro partes iguales la cantidad de agua extraída en cada una de ellas, de arriba abajo, corresponde al 40, 30, 20 y 10% del total respectivamente. Debido a esta distribución del consumo de agua, para el diseño de riego no se considera la profundidad máxima de enraizamiento, sino la que se denomina profundidad efectiva, que para algunos autores comprende el 75% de la profundidad total, mientras que para otros comprende entre el 70 y 90% (Pascual, 2008)

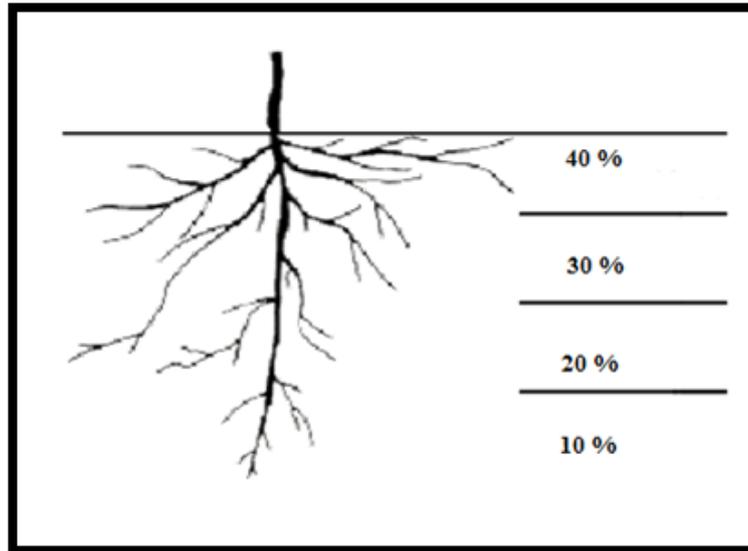


Figura 2.9. Agua consumida por las plantas

Fuente: <http://www1.unex.es/eweb/edafo/GCSP/GCSL3DQSaliLavado,htm>

La profundidad del sistema radicular depende de la especie y de la fase de su ciclo vegetativo. En general puede decirse que la profundidad de las raíces de los cultivos permanentes en suelos medios puede superar de 1,5 a 2 m.

En la Figura 2.10 se puede observar el sistema radicular de la palma aceitera en su mayoría son horizontales. Se encuentran en los primeros 50 cm del suelo, sólo la mayoría de las raíces primarias descienden en el suelo con un ángulo muy ligero respecto a la base de la palma, algunas llegan hasta a 4,5 m la de superficie, el número es muy variado y continúan produciéndose a lo largo de la vida de la palma. El diámetro de las raíces en cada sistema disminuye gradualmente del promedio de cerca de 1 cm, para las primarias, hasta de 0,5 mm en las cuaternarias. La distribución de raíces en el suelo depende grandemente de las condiciones de suelo. Las raíces se encuentran en las interlíneas, como a 3 o 4 m de la palma



Figura 2.10. Raíces de la palma aceitera.

Fuentes: http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_aceite.htm

Entre las características físicas del suelo destaca la textura, de forma que el sistema radical es más profundo en los suelos de texturas gruesas que en los de textura fina.

2.2.12 Productividad del suelo

Vergara (2001), en su trabajo de titulación indica que la productividad de un suelo se define como la capacidad de producir una planta o sucesión de plantas bajo un determinado sistema de manejo. Por lo tanto, un suelo productivo es aquel que en condiciones químicas, físicas y biológicas es favorable para la producción económica de los cultivos. La capacidad productiva depende del manejo, condiciones climáticas y características naturales. En un suelo de poco o nula productiva podrá levantar su capacidad al aplicar en él una tecnología determinada como fertilización, riego tecnificado, drenaje, entre otras.

2.3 Necesidades de agua en los cultivos

Si al regar un terreno ocupado por cultivos, de la cantidad de agua aplicada regresará a la atmósfera por medio de dos fenómenos la transpiración del cultivo y la evaporación que se da en el suelo cultivado.

Según Vergara (2000), las necesidades de agua en los cultivos se les conocen como uso consuntivo o evapotranspiración (ETP). Se define como la sumatoria de aguas que

utiliza la planta para llevar a cabo todas sus funciones fisiológicas. Esta sumatoria es el agua que expulsa la planta a través de las hojas por transpiración, la que se pierde directamente del suelo adyacente a la planta por evaporación, así como el agua interceptada por el follaje.

La diferencia entre los conceptos de uso consuntivo y evapotranspiración estriba en el agua de constitución (es el agua que utiliza la planta en la formación de los tejidos durante todo su ciclo. Su contenido es tan bajo con respecto al agua evaporada (del orden del 1%), que no es significativo en el resultado final, por lo que ambos conceptos se consideran sinónimos, sin embargo, se utiliza más el concepto de evapotranspiración.

2.3.1 Transpiración

Se produce cuando la pierde agua en forma de vapor a través de poros llamados estomas, El agua adsorbida por las raíces mediante diferentes mecanismos, es llevado hasta las hojas por medio del xilema (tejido conductor de agua y minerales de la planta).

2.3.2 Evaporación

Consiste en la pérdida de agua del terreno adyacente a la planta, así como la que se pierde directamente por las hojas. La evaporación se ve afectada por la radiación solar, así como la latitud, estación del año, hora del día y nubosidad.

2.3.3 Evapotranspiración

Se refiere a la cantidad de agua que necesitan las plantas para poder cumplir sus necesidades de transpiración, así como las de evaporación del medio en que se desarrollan.

La evapotranspiración potencial es la tasa de evapotranspiración de una superficie uniforme de gramíneas de 8 a 15 cm de altura, de crecimiento activo y sin escasez de agua. Por otro lado, la evapotranspiración real se define como la evaporación de un cultivo exento de enfermedades en un campo extenso, en condiciones óptimas de

fertilidad y bajo condiciones de humedad que le permita alcanzar su potencial de producción (Valverde, 2000).

2.3.4 Factores que afectan la evapotranspiración

La evapotranspiración se depende de los siguientes factores:

a. Elementos climáticos

La evapotranspiración es afectada por varios elementos climáticos. Uno de ellos es la radiación solar, que aporta la energía para el paso de líquido a vapor; la temperatura y la humedad relativa, que determina la capacidad de la atmósfera para aceptar el vapor producido. También incide el viento, que desplaza el vapor que se acumula en las hojas.

A temperaturas altas la transpiración es mayor, lo mismo que en presencia de la luz, pues los estomas se abren para dejar salir aire húmedo.

b. Tipo de cultivo

Las características propias de cada planta, como su altura, flexibilidad, así como la orientación y densidad de siembra, la etapa de crecimiento y la duración del ciclo vegetativo, Si la vegetación es alta y densa, es mayor la evapotranspiración.

c. Características físicas del suelo

Las características físicas del suelo como textura, estructura, capacidad de retención de humedad, profundidad, entre otras afecta la evapotranspiración. Valverde (2000) explica que en un suelo arenoso, con baja retención de humedad, se seca más rápidamente. También, cuando el volumen de suelo explorado por las raíces es pequeño, la absorción de agua es menor.

d. Contenido de humedad del suelo

Para que haya evapotranspiración el suelo debe estar humedecido, en la medida en que el suelo se encuentre a capacidad de campo, la evapotranspiración será mayor, pues el cultivo no tiene que hacer mucho esfuerzo para extraer el agua. Para la evapotranspiración también influye el método y la eficiencia de riego. Es decir, que

entre más húmedo esté el suelo mayor es la evapotranspiración y pueda que existan pérdidas por aplicación.

En la Figura 2.11 se puede observar un resumen de los factores que afectan la evapotranspiración:

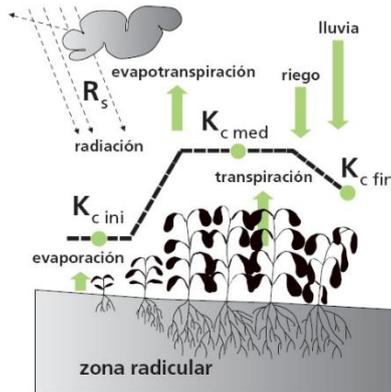


Figura 2 11. Factores que influyen en las necesidades de agua de los cultivos.

Fuente: <http://prunusdulcis,110mb.com/necesidades.html>

2.3.5 Medición de la evapotranspiración

Para poder medir la evapotranspiración de un cultivo (E_{Tr}), también conocida como evapotranspiración real, se parte del conocimiento de dos parámetros, la evapotranspiración potencial (E_{To}), que se calcula por varios métodos y el coeficiente del cultivo (K_c), factor que depende del grado de desarrollo del cultivo. Para calcular E_{Tr} se hace a través de la ecuación 22:

$$E_{Tr} = E_{To} \times K_c \dots \dots \dots (22)$$

Donde:

E_{Tr} = evapotranspiración real.

E_{To} = evapotranspiración potencial, expresada en milímetros.

K_c = coeficiente de cultivo adimensional.

2.3.6 Evapotranspiración potencial (ET_o)

Valverde (2000), lo señala como el procedimiento de cálculo de las necesidades de agua de un cultivo de referencia. Es la evapotranspiración que ocurriría en un área sembrada de gramíneas, de 8 a 15 cm de altura, de crecimiento vigoroso con cobertura completa y sin limitaciones de agua. Además, por medio de correlaciones entre ET_o y datos de estaciones climatológicas, tomando en cuenta su posición (latitud y longitud), se han desarrollado ecuaciones para estimar ET_o dependiendo de la información climática.

Los métodos de Penman y de la radiación, pueden ofrecer buenos resultados para períodos de 10 días y el Blanney Criddle es efectivo para períodos de un mes.

A pesar de que existen muchos métodos para medir la evapotranspiración, el método de Penman es bastante preciso, pues en variedad de condiciones ha dado estimaciones muy acertadas y presenta coincidencia con los resultados obtenidos de la medida de humedad con lisímetro. El uso de este método tiene el inconveniente de que algunos de sus datos no se encuentran en todas las estaciones meteorológicas y su uso es complicado.

También existe el método de Hargreaves que es muy usado en Costa Rica. Dicho método incorporó el uso de la temperatura media en grados Fahrenheit y radiación solar incidente expresada en milímetros de agua evaporada. Por último, el método de Blanney Criddle que es muy sencillo de usar, tanto por su metodología como la comodidad para conseguir su información requerida, sin embargo, debe ser complementado con el coeficiente K_c de consumo, determinados localmente para que su aplicación sea correcta. Se aplica para períodos mensuales y contempla el uso de datos sobre porcentaje de horas de sol y temperatura. El porcentaje de horas sol se puede obtener de tablas especiales según latitud.

2.3.7 Coeficiente del cultivo

Se conoce como K_c un valor dependiente de las características anatómicas, morfológicas o fisiológicas de la planta. El K_c varía según el periodo de crecimiento de la planta y del clima determinado. Depende de la capacidad de la planta para extraer el

agua del suelo, según su estado de desarrollo vegetativo. No se recomienda utilizar cuando los datos de evapotranspiración real se obtiene con métodos directos (Uso de lisímetros, Evapotranspirómetro de Thornthwaite, Método gravimétrico).

El coeficiente K_c es el resultado de la relación entre la evapotranspiración de un cultivo, durante una etapa definida, con la evapotranspiración de referencia, K_c se obtiene con la ecuación 23:

$$K_c = \frac{E_{Tr}}{E_{To}} \dots \dots \dots (23)$$

Donde:

K_c = coeficiente de cultivo, adimensional.

E_{Tr} = evapotranspiración real.

E_{To} = evapotranspiración potencial, expresada en milímetros.

Para determinar el coeficiente de desarrollo de los diferentes cultivos se debe, definir el ciclo vegetativo del cultivo y establecer las diferentes etapas de desarrollo, El primero depende de la variedad, el clima y la fecha de siembra.

El segundo, el período vegetativo de los cultivos se divide en cuatro fases, de diferente magnitud para cada uno y en función del clima donde se desarrollen. Estas fases son: fase inicial que va desde la germinación a un 10% del crecimiento, fase de desarrollo del cultivo, que se caracteriza por ser el estado de máximo crecimiento, es cuando se alcanzado el 70 –80% de cobertura superficial, fase de mediados de período, es el estado que va desde la fase de desarrollo hasta la maduración del cultivo. Por último fase de finales del período, que es cuando la planta posee el fruto maduro listo para la cosecha.

2.4 Requerimiento de riego

Como se ya se ha indicado, es importante proporcionarle a la planta la cantidad de agua que necesita para que lleve a cabo sus funciones de desarrollo, crecimiento y producción. Para ello se necesita conocer aspectos agronómicos que ayuden a tener una idea de la cantidad de agua que requiere la planta sin que haya desperdicios.

La cantidad de agua a aplicar depende de la densidad aparente, profundidad radicular, criterio de riego y agua útil. Esta cantidad de agua a reponer está relacionada con la transpiración de la planta y evaporación del suelo debido a factores climáticos. Conociendo los factores agronómicos que intervienen en las necesidades hídricas del cultivo llegamos a obtener datos que ayuden a conocer los requerimientos de riego.

2.4.1 Láminas de riego

Se define como una determinada cantidad de agua que se debe aplicar al suelo para que satisfaga las necesidades del cultivo; depende del peso específico aparente del suelo, profundidad de las raíces y zona de adsorción.

Las raíces absorbentes tienden a concentrarse a unos 30 - 40 cm de la superficie del suelo, en donde se presenta la mayor adsorción del agua (Valverde, 2000).

Si la capa superior del suelo tiene baja capacidad de retención y no se repone el agua en el momento oportuno, o se permite agotamiento de humedad muy altos, entonces las raíces empiezan a profundizar para utilizar la humedad en las capas inferiores, lo cual debilita la planta y retrasa su crecimiento. Para efectos prácticos, se recomienda reponer el agua por cierta regularidad, considerando profundidades de 30 a 50 cm, dependiendo del cultivo.

El porcentaje al cual se permite bajar la humedad del suelo antes de regar y sin que la producción disminuya se le denomina punto crítico y se encuentra entre el valor de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. El punto crítico varía con el tipo de cultivo, etapa de desarrollo, suelo y clima y debe ser evaluado en el campo (Illescas, 2007).

Al rango entre capacidad de campo y el punto crítico se le conoce como déficit permitido de manejo. Normalmente se expresa como porcentaje de humedad aprovechable total que puede ser utilizada por el cultivo sin que este disminuya su producción.

2.4.2 Lámina máxima de riego

Es la máxima lámina de agua que retiene el suelo para satisfacer las necesidades del cultivo, su capacidad de retención se produce hasta la profundidad de raíces del cultivo. Para calcular la lámina máxima se hace a través de la ecuación 24:

$$LMA = \frac{CC-PMP}{100} \times P_{ap} \times P_r \dots \dots \dots (24)$$

Donde:

LMA= lámina máxima (cm).

CC= capacidad de campo (%).

PMP= punto de marchitez permanente (%).

Pap= peso específico aparente (g/cm³).

Pr= profundidad radicular efectiva (cm).

2.4.3 Lámina neta o dosis neta de agua

Es la lámina que se utiliza para diseñar un sistema de riego y la humedad fácilmente aprovechable por la planta.

Para su cálculo se toma en cuenta una condición de manejo de vital importancia, y como ya se había indicado se refiere al porcentaje de agotamiento permitido en términos de tensión, el potencial matricial o succión a que debe aplicarse el riego.

Con el porcentaje de agotamiento de la humedad, que se refiere a la humedad con que se agota el agua en el suelo o el aprovechamiento del agua por parte del cultivo hasta que se aplique el próximo riego, y la lámina máxima se obtiene la lámina neta que se calcula con la ecuación 25:

$$L_n = LMA \times Ag \dots \dots \dots (25)$$

Donde:

Ln= lámina neta (cm).

LMA= lámina máxima (cm).

Ag= agotamiento o aprovechamiento (decimal).

2.4.4 Lámina bruta

En todo método de riego siempre hay pérdidas considerables que se dan desde la derivación del agua hasta el nivel de la parcela, por eso no es recomendable aplicar la lámina neta, sino que hay que aplicar una cantidad mayor a esta y se le conoce como lámina bruta.

Para Valverde (2000) este concepto pretende garantizar que el agua que se deriva desde la fuente de abastecimiento, sea la necesaria para satisfacer las necesidades del sistema de riego.

Las eficiencias están en función del método de riego utilizado, la textura y la topografía, en el Cuadro 2.5 se indican estimaciones de porcentaje de eficiencia propuestos por algunos investigadores (Valverde, 2000).

Cuadro 2.5. Eficiencias de riego estimadas en función del método de riego.

Método de riego	% Eficiencia
Gravedad	45 – 65
Aspersión	75 – 80
Goteo	85 – 90

Fuente: Valverde (2000)

Para calcular la lámina bruta se hace a través de la ecuación 26:

$$Lb = \frac{Ln}{Ef} \dots \dots \dots (26)$$

Donde

Lb= lámina bruta (cm).

Ln= lámina neta (cm).

Ef= Eficiencia (decimales).

2.4.5 Frecuencia o intervalo de riego

Es el intervalo de tiempo entre riego, es importante para abastecer de agua al cultivo con base a ciertas condiciones de manejo, Para obtener la frecuencia de riego se debe tener información de la lámina neta y la evapotranspiración o uso consuntivo del mes crítico. Para calcular la frecuencia de riego se hace mediante la ecuación 27:

$$Fr = \frac{Ln}{ETr} \dots\dots\dots (27)$$

Donde

Fr= frecuencia de riego (días).

Ln= lámina neta (cm).

Etr= evapotranspiración real diaria.

2.4.6 Cálculo del número de riego

Es el número de riego que se debe aplicar cada mes, se calcula con la ecuación 28:

$$N^{\circ} = \frac{ETr}{Ln} \dots\dots\dots (28)$$

Donde:

N°= número de riego por mes.

Ln= lámina neta (cm).

Etr= evapotranspiración real por mes.

2.4.7 Velocidad de avance del cañón

Según Tarjuelo (2005), la velocidad de avance del cañón se estima entre 5 y 50 m/h, y se calcula con la ecuación 29:

$$V = \frac{1000 \times Q}{Lb \times E} \dots\dots\dots (29)$$

Donde:

Q= Caudal del sistema (m³/h)

Lb= lámina bruta (mm)

E= Espaciamiento (m)

La ecuación 29 supone que toda el agua descargada por el cañón cae dentro de la parcela, lo cual no es cierto ya que, de acuerdo con el solapamiento fijado, parte de esa agua cae fuera del área de riego, recibiendo las zonas de los bordes menos cantidad de agua.

2.7.8 Tiempo de riego

El tiempo necesario para realizar una postura de riego depende de la longitud dependerá la longitud a recorrer y de la velocidad de avance, debiendo tener en cuenta además el tiempo sin funcionamiento sin avance al principio y final de la misma, así como la conveniencia de realizar una o más pautas de riego al día (Tarjuelo, 2005).

El tiempo d riego que debe dar el cañón al principio sin desplazarse está dada por la ecuación 30:

$$Ti = \frac{2}{3} \times \frac{\alpha}{360} \times \frac{R}{V} \dots \dots \dots (30)$$

Ti= tiempo de inicio de la banda (h)

α = ángulo del sector circular regado (200 – 220°)

R= Radio mojado (m)

V= velocidad de avance (m/h)

El tiempo d riego que debe dar el cañón al final de la banda sin desplazarse está dada por la ecuación 31:

$$Tf = \frac{2}{3} \times \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right) \times \frac{R}{V} \dots \dots \dots (31)$$

Tf= tiempo al final de la banda (h)

α = ángulo del sector circular regado (200 – 220°)

R= Radio mojado (m)

V= velocidad de avance (m/h)

El tiempo de riego de riego total depende del largo de la banda a regar, del tiempo al inicio y al final de la banda:

$$tr = \frac{(l - \frac{2 \times R}{3})}{v} + tf + ti \dots \dots \dots (32)$$

l= Longitud de la banda (m)

R= Radio mojado (m)

V= velocidad de avance (m/h)

Ti= tiempo de inicio de la banda (h)

Tf= tiempo al final de la banda (h)

2.5 Riego por aspersión y sus componentes

Consiste en aplicar el agua en forma de finas gotas por medio de aspersores, la intensidad con que cae el agua al suelo debe ser menor que la infiltración básica. Es por esta razón que en todo sistema de riego con aspersores se requiere de presión que es suministrada por una bomba o la diferencia de altura existente entre sitio de toma y el área a regar. El agua es conducida por medio de tuberías hasta llegar a los aspersores. Para Illescas (2007), todos los cultivos, exceptuando el arroz pueden ser regados por aspersión:

Un sistema de riego por aspersión tiene las ventajas de usarse en todo tipo de suelo y cultivo, se adapta a terrenos de topografía muy variada y se logra una alta eficiencia de riego.

Sin embargo se ve limitado por el alto costo de la instalación, y se pierde uniformidad si el viento de la zona es fuerte, puede afectar la parte aérea de los cultivos.

La clasificación de equipos de riego por aspersión se clasifican en: equipos fijos, equipos portátiles, equipos de movimiento intermitente y equipo de movimiento continuo (cañón viajero, pivote central, lateral móvil).

Los equipos de movimiento continuo tienen las características de proveer una distribución uniforme del agua, además reduce al mínimo los tiempos muertos como es el caso del cañón viajero (Illescas, 2007).

Si bien las conducciones móviles se fabricaban de acero, en la actualidad se utilizan fundamentalmente las aleaciones de aluminio, siendo también posible la utilización de tuberías de material de plásticos (Pascual, 2008).

2.5.1 Fuente de agua

La fuente puede ser un canal, un pozo, un río, entre otros. En un diseño de riego la fuente de agua juega un papel fundamental y los aspectos más importantes a tomar en cuenta son la ubicación, calidad del agua, el costo y el caudal.

En cuanto a la ubicación es importante conocer el nivel entre la fuente y el terreno a regar para colocar el grupo de motobombas o si se puede aprovechar la energía potencial esto con el fin de distribuir el agua en condiciones de presión de operación adecuadas. La presión se necesita para que los aspersores puedan funcionar adecuadamente. La motobomba puede ser fija o móvil; fija cuando el agua se saca de un pozo y móvil cuando se desplaza a lo largo de un río.

2.5.2 Tuberías y Accesorios

Según Valverde (2000), se refiere a las tuberías de conducción, de distribución y los regantes o laterales. La conducción es la que se encarga de llevar el agua desde la fuente hasta las líneas de distribución. Está construida de diversos materiales, como hierro y asbesto, PVC (cloruro de polivinilo), con diámetros que oscilan entre 50 hasta 250 milímetros y longitudes de 6 y 9 m cuando se trata de aluminio, esta tubería vienen diseñadas para soportar presiones de trabajo de 8,8 kg/cm². Cuando se va a calcular pérdidas por fricción es importante utilizar el diámetro interno de la tubería. Las tuberías de distribución une las líneas regantes con las tuberías de conducción y se

construyen de los mismos materiales, en diámetros que oscilan de 101,6 mm a 203,2 mm (4 a 8 pulgadas), ver Figura 2.12:



Figura 2.12. Tubos de aluminio de 6 pulgadas (0,1524 m) y 9 metros de longitud.

Las tuberías de aluminio son utilizadas para riego móvil, es decir cuando se trasladan las tuberías de un lado a otro, por su bajo peso, en el Cuadro 6 se muestran tuberías comerciales de aluminio.

Cuadro 2.6. Diámetros en tuberías de aluminio.

DIÁMETRO NOMINAL (mm)	DIÁMETRO INTERNO (mm)
50	48,81
75	74,01
100	99,21
127	124,36
150	149,45
175	174,55
200	199,54
250	249,38

Las líneas regantes son las que llevan acoplados los aspersores y se construyen de aluminio o polietileno.

Los accesorios son todos los elementos para que las tuberías se distribuyan bien en el campo y funcionen correctamente. Se refiere a acoples, codos, tees, válvulas, hidrantes, reducciones, empaques, elevadores, tapones, etc. Los acoples son de gran importancia en el manejo del equipo, pues deben permitir su traslado, el acople rápido de la tubería y mantener una unión hermética para evitar fugas de agua y presión. El sistema de acople de las tuberías de aluminio, se basa en lo que se denomina acople rápido con el fin de facilitar el acople como que exista flexibilidad, y se pueda dar cierto ángulo entre tuberías con la intención de adaptarlo a la topografía del terreno. El acople puede ser mediante un gancho o un resorte interno que se sella con la presión del agua. El ángulo que permite el empaque varía entre 12 y 30 grados.

2.5.3 Aspersores

Son los encargados de distribuir el agua en forma de pequeñas gotas sobre el terreno. Se compone de tres partes principales; la base, el tubo conector, cuerpo del aspersor, resorte, brazo del martillo, freno y boquilla, ver Figura 2.13:

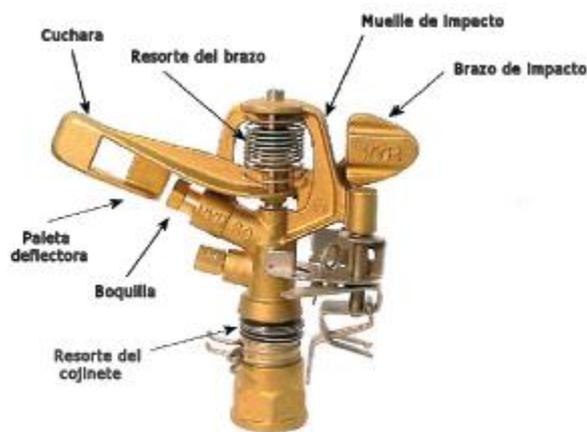


Figura 2.13. Aspersor de impacto y sus componentes.

Las boquillas pueden verse afectadas por las partículas de arenas que tenga el agua. Las boquillas pueden ser de metal o plásticas, las últimas resisten más el desgaste. Las boquillas pueden ser en forma ovalada o circular. Las primeras dispersan el agua a una menor distancia y las últimas a mayor distancia. La boquilla forma cierto ángulo con la

horizontal, el cual varía desde 4° hasta 30°, a medida que el ángulo aumenta, también aumenta la distancia de alcance.

A los aspersores se les pueden cambiar las boquillas para ajustarlos a las descargas que se requieren. Generalmente las boquillas están dadas en milímetros o pulgadas, pero también existen con diferentes colores, donde cada color es para cierta descarga; esto está definido en los catálogos de los aspersores.

Aunque la gran mayoría son giratorios (giro total o parcial), también hay fijos y pueden tener una o dos boquilla que son las encargadas de determinar la carga del aspersor. El movimiento puede ser provocado efecto de impacto. Es decir el chorro de agua choca con el director de flujo y lo defleca con el eje vertical, el resorte que posee el aspersor restringe la deflexión devolviéndolo hacia atrás y golpeando el cuerpo del aspersor haciéndolo rotar. La rotación del aspersor es de 3 rpm, Los caudales de los aspersores son variables, desde 0,3 m³/h hasta 40 o más m³/h, con rango de carga desde 10 metros columna agua (m.c.a) hasta 60 m.c.a.

Los aspersores se pueden clasificar según la presión o descarga. Si se clasifica según la presión podemos encontrar los aspersores de baja presión que trabajan con presiones entre 1 a 2 atmósferas (10 - 20 m.c.a). También, los de presión intermedia que funcionan entre 2 y 4 atmósfera (20 - 40 m.c.a). Por último tenemos los de alta presión que operan entre 4 y 7 atmósfera (40 - 70 m.c.a); se les conocen como cañones (Valverde, 2000).

Los cañones son equipos que van montado sobre ruedas para permitirle el movimiento y está provisto de un aspersor de autopropulsión que trabaja a alta presión, de esta manera se logra un gran alcance en el chorro de agua lanzado. El agua es bombeada de la fuente y conducida al cañón por una manguera flexible que está enrollada en una carreta y la cual se desenrolla al desplazarse el cañón e irse regando el terreno por franja. Según estudio realizado por la FAO la pluviometría conseguida por un cañón está comprendida entre 7 y 15 mm/hora. Los chorros tienen un alcance de 30 a 70 m. Las estaciones están separadas de 50 a 100 m. El peso del cañón hace necesario un soporte sólido y debe estar bien apuntalado y el conjunto es demasiado pesado para desplazarlo un solo operario.

La rotación del cañón está asegurada por un batidor o dos batidores movidos o accionados alternativamente por el chorro, o también por una rueda dentada provista de una paleta accionada por el chorro de la boquilla secundaria que asegura en este último caso la rotación continua del cañón, ver Figura 2.14:



Figura 2.14. Aspersor tipo cañón.

En algunos casos los cañones de riego trabajan en sector, girando solamente una fracción de vuelta. A este efecto están provistos de un dispositivo que realiza automáticamente la inversión del sentido de rotación alrededor de un eje vertical. Otros modelos están equipados con dispositivos de recuerdo, llamados vueltas rápidas, de manera que el cañón barre su sector siempre en el mismo sentido de rotación y vuelve rápidamente a la posición de partida.

Los cañones de riego están equipados con una boquilla que se puede intercambiar. Los resultados para un mismo cañón son muy distintos en función de las boquillas escogidas, y pueden ser adaptados a diferentes necesidades.

Si se toma la descarga para clasificar los aspersores tenemos, aspersores de baja descarga (0,05 a 0,5 litros por segundo), aspersores de mediana descarga (0,15 a 0,90 litros por segundos) y los de alta descarga como los llamados cañones que las descargas son arriba de los 10 m.c.a.

Según Villalobos (2009), hay muchos factores que afectan al aspersor, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

a. La boquilla del aspersor: los aspersores pueden tener una o más boquillas con diferentes diámetros. Cuando un aspersor posee una sola boquilla, ésta hace en forma simultánea la distribución del agua como el alcance. Si tiene 2 boquillas, una da el alcance y la otra distribuye el agua. En el caso de aspersores que tienen 3 boquillas, una de ellas da el alcance y las otras dos se encargan de distribuir el agua. De la boquilla del aspersor va a depender el caudal de éste, diámetro de la gota y la distribución del agua. El diámetro de la gota que da el aspersor va a aumentar conforme aumenta el diámetro de la boquilla a una presión constante. El modelo de distribución de agua que da el aspersor depende entre otras cosas de la boquilla o boquillas. Por lo que es importante escoger adecuadamente el diámetro de la boquilla para dar el caudal adecuado que requiera el cultivo sin haya pérdida de agua por escorrentía o percolación.

b. Presión de operación del aspersor: Los aspersores están diseñados para trabajar en cierto rango de presiones, el caudal que entrega el aspersor depende de la presión, es decir, que a medida que aumenta la presión mayor es el caudal, Si el sistema de riego entrega una presión que se sale del rango de presión el aspersor estará trabajando en forma deficiente, El fabricante es el encargado de brindar la información del rango óptimo de presión a la cual trabaja el aspersor.

c. Ángulo de salida del agua: esta varía de 4 a 30 grados con respecto a la horizontal, El ángulo se escoge en función del cultivo a regar.

d. Viento: La dirección del viento así como la velocidad influyen en el funcionamiento y distribución del agua. El viento hace que se aplique agua fuera de la zona requerida con lo cual no hay una buena distribución. No es conveniente regar cuando hay fuertes vientos, para poder contrarrestar el efecto del viento se puede hacer espaciamiento entre aspersores y laterales pequeños, siempre y cuando el grado de aplicación no provoque escorrentía. Una regla general dice que el espaciamiento entre aspersores debe ser el 50% del diámetro de cobertura aspersor proporciona. Existen varios criterios en cuanto al espaciamiento que deben tener tanto los aspersores como laterales en función de la velocidad del viento. Por ejemplo, si velocidad del viento está entre 3 - 6 Km/h, entonces la reducción entre

aspersores es del 10%, si la velocidad del viento es de 6-12 Km/h la reducción está entre 30-35%. Si no hay viento, o es leve, el espaciamiento entre aspersores es el 40% del diámetro de cobertura, 60 y 75% el espaciamiento entre lateras para dos boquillas y 70 y 75% para una boquilla.

e. Elevador del aspersor: la conexión entre el aspersor y el lateral es el elevador, éste debe tener una altura óptima según el tipo de cultivo. El elevador debe sobresalir por encima del cultivo y debe estar totalmente vertical, para lo cual se utilizan estabilizadores.

2.5.6 Seleccionar el aspersor

Según Villalobos (2009), para seleccionar el aspersor es necesario contar con el catalogo del fabricante donde viene la información del diámetro de la boquilla del aspersor, presión del aspersor, caudal que da el aspersor, diámetro o radio de humedecimiento, coeficiente de uniformidad y en algunos casos el espaciamiento.

Existen varios criterios para seleccionar el aspersor. El primero caso tenemos, conocer la infiltración básica y castigarla por un factor que depende de la pendiente que se tenga en el terreno, esto se muestra en el Cuadro 2.7:

Cuadro 2.7. Factor de reducción de infiltración.

Pendiente %	% Reducción	Factor f
0 - 5	0	1
6 - 8	20	0,80
9 - 12	40	0,60
13 - 20	60	0,40
> 20	75	0,25

Fuente: Villalobos (2009)

A la hora de aplicar el agua en el terreno con los aspersores, hay que tener en cuenta que el chorro de agua puede ser distorsionado por la velocidad y dirección del viento, por lo que existen cuadros que dan el espaciamiento entre posiciones de riego más adecuado en función de la necesidad del viento como se muestra en el Cuadro 2.8:

Cuadro 2.8. Espaciamiento de un cañón en función del viento.

	Velocidad del viento (m/s)			
	0 a 1	1 – 2,5	2,5 – 5	5
Espaciamiento (% del diámetro mojado)	80	75 - 70	65 - 60	55- 50

Fuente: Villalobos (2009)

La orientación que debe seguir el cañón es mejor que sea perpendicular a los vientos dominantes y se debe situar el cañón al comienzo del riego a una distancia del borde de la parcela igual a 2/3 del radio de alcance del cañón.

Se pueden usar otros criterios para seleccionar los espaciamientos entre aspersores en función del viento y el espaciamiento que se adopte, ver Cuadro 2.9.

Cuadro 2.9. Separación entre aspersores en función del viento y el espaciamiento adoptado.

Velocidad del viento	Espaciamiento en % del diámetro			
	Cuadro	Rectángulo		Triángulo
		A	EL	
Sin viento	65	5	65	75
Hasta 6 Km/h	60	0	65	70
Hasta 12 Km/h	50	0	60	60
Hasta 15 Km/h	40	0	50	35
mayor 15 Km/h	30	0	40	35

Fuente: Villalobos (2009)

También se puede obtener el coeficiente de uniformidad y la eficiencia de aplicación en función del viento como se muestra en el Cuadro 2.10:

Cuadro 2.10 Coeficiente de Uniformidad y Eficiencia de aplicación en función de la velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s)	Coeficiente de uniformidad	Eficiencia de aplicación (%)
0 - 2	82	77
2 - 4	70	65

Después de conocer la infiltración y castigada por un factor según la pendiente del terreno (este es el máximo grado de aplicación que se puede dar en el terreno) para evitar que se produzca escurrimiento, se eligen espaciamientos entre aspersores y laterales en función de las longitudes estándar de tuberías existentes. Lo anterior según Villalobos (2009), con los espaciamientos dados el grado máximo de aplicación se calcula el caudal que puede dar el aspersor con la ecuación 33:

$$Q = \frac{I \times A}{1000} \dots \dots \dots (33)$$

Q= Caudal (m³/h)

I= Intensidad de aplicación (mm/h)

A= Área (m²)

Conociendo el máxima caudal que puede dar el aspersor, con base a cuadros dados por los fabricantes se elige el aspersor, entrando con el caudal máximo o ligeramente menor a éste. Una vez elegido el aspersor verificar si el espaciamiento que cumple en función de la velocidad del viento que se tiene en la toma; es decir, el diámetro de humedecimiento que da el aspersor multiplicado por el factor en función de la velocidad del viento debe ser mayor que el espaciamiento elegido.

2.5.7 Distribución de las tuberías

Para Villalobos (2009), en un sistema por aspersión se debe colocar la tubería en dirección a la máxima pendiente, esto provoca que la tubería lateral tenga presiones más uniformes.

Las tuberías secundarias se deben trazar perpendicular a la tubería principal, y en lo posible a nivel. Las tuberías secundarias se deben colocar en dirección perpendicular al viento, sin embargo, este criterio no es posible de cumplir en muchas ocasiones porque todo depende de las condiciones del terreno que se tenga.

Las longitudes de los laterales en lo posible deben ser lo más uniforme, al igual de los diámetros de estas, prefiriéndose un solo diámetro sobre todo si los laterales son móviles.

Cuando el campo tiene una forma irregular, se debe de uniformizar un área para regar con uno o más laterales y el sobrante del área regarlo por medio de un secundario derivado del principal.

Las diferentes secuencias de operación que se adopten deben ser lo más económico posible.

2.6 Datos necesarios para el diseño hidráulico

Para llevar a cabo un diseño de riego por aspersión se debe contar con cierta información básica.

2.6.1 Plano topográfico

Debe mostrar las diferentes alturas que se tengan en el terreno con respecto a la fuente de agua, es decir deben estar a curvas de nivel.

Se debe tener definida el área donde se va a implementar el riego, así como la fuente de agua y obstáculos que se tenga el terreno, tal como caminos, puentes, entre otros. Estos datos son importantes para la ubicación de las diferentes tuberías,

2.6.2 Condiciones de la zona

En este se debe conocer las diferentes texturas y capacidades de retención de agua, densidad aparente, velocidad de infiltración de agua, salinidad, presencia de tabla de agua entre otros. Los cultivos que se piensan implementar y de estos, su profundidad radicular y coeficientes de cultivo (kc).

También, es necesario contar con información de las condiciones climáticas de la zona, para ello, se debe calcular la evapotranspiración potencial para el cultivo que se trate y tener conocimientos sobre la dirección y velocidad del viento.

Con la información recolectada de las condiciones de la zona se procede a calcular la lámina neta a aplicar y frecuencia de riego, el aspersor a utilizar y intensidad de aplicación.

2.6.3 Números de posiciones del lateral por días

De acuerdo con Villalobos (2009), el número máximo de posiciones depende del tiempo total de operación, el tiempo de riego que se tarda en dejar la lámina neta y el tiempo de cambio, es un indicador para no gastar más agua del permitido, mediante la ecuación 34 se puede calcular el número de posiciones del lateral por días:

$$N_p = \frac{H_r}{t_r + t_c} \dots \dots \dots (34)$$

N_p = Número de posiciones del lateral por días

H_r = Horas total de riego por días (h)

t_r = tiempo de riego (h)

t_c = tiempo de cambio (h)

2.6.4 Calculo del caudal para regar el área propuesta

Para Villalobos (2009), es el caudal necesario para regar toda el área donde se va a implementar el sistema de riego. El caudal va a depender del área a regar, lámina neta aplicar, ciclo riego, hora de operación por día y la eficiencia de aplicación, para estimar el caudal se puede hacer uso de la ecuación 35:

$$Q_r = \frac{100 \times A_r \times L_n}{C_r \times H_{op} \times Ef} \dots \dots \dots (35)$$

Q_r = Caudal requerido (m^3/h)

H_{op} = horas de operación (h)

A_r = Área requerida (ha)

L_n = Lámina neta (cm)

C_r = Ciclo de riego (días)

Ef = eficiencia de riego (decimal)

Cuando el caudal no es restringido, se puede llevar a cabo un diseño, donde se riega en un tiempo total mucho menor que la frecuencia de riego, sin embargo esto hace que el sistema se torne más caro; ya que se requiere un sistema con diámetros de tubería grandes, bomba grande y por consiguiente alto costo de energía.

2.6.5 Pérdidas por fricción en la tubería

Villalobos (2009), indica que las pérdidas de carga a fricción que ocurren en una tubería lateral, se pueden calcular según el diámetro de la tubería, el número de aspersores, descarga por aspersores, y espaciamiento entre aspersores.

En este caso se calcularán las pérdidas usando la ecuación de Hazen Williams para tuberías con diferentes salidas:

$$h_f = 1,131 \times 10^9 \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \times D^{-4,872} \times L \times F \dots \dots \dots (36)$$

h_f = Pérdidas en la tubería (m/m)

D = Diámetro de la tubería del lateral (mm)

Q = Caudal de la tubería (m^3/h)

C = Coeficiente de Hazen Williams según el tipo de material

F = Factor según el número de salidas

Para calcular el factor según el número de salidas se hace con la ecuación 37:

$$F = \frac{1+2^m+3^m+4^m+\dots+N^m}{N^{m+1}} \dots\dots\dots (37)$$

N= número de salida del lateral.

m= Factor que depende del tipo del material.

Los valores del coeficiente de Hazen Williams, para tuberías de diferentes materiales se puede observar en el Cuadro 2.11:

Cuadro 2.11. Coeficiente de Hazen Williams según el material.

Material	Coficiente C
Acero Nuevo	140
Aluminio Nuevo	140
Acero Viejo (15 años)	120
Acero Remachado (10 años)	110
Aluminio con acoples	120
Galvanizado con uniones	115
P,V,C	150
Polietileno	140

Para la ecuación 37 es necesario saber el factor “m” que depende del material, en el Cuadro 2.12 se estiman algunos valores para ciertas tuberías:

Cuadro 2.12. Factor m según el material tipo de material.

Valor del Factor m	
Material	m
Plástico	1,76
Aluminio	1,852

2.6.6 Pérdidas en accesorios

Según Villalobos (2009), para calcular las pérdidas secundarias compuestas por codos, uniones, tees, entre otros; se hace con la ecuación 38:

$$hf_s = K \times \left(\frac{V^2}{2 \times g} \right) \dots\dots\dots (38)$$

Donde

h_{fs} = pérdida por fricción debida al accesorio (m).

K = coeficiente de pérdidas según accesorio.

V = velocidad del agua en m/s.

g = valor de la aceleración de la gravedad, 9,81 m/s².

En el Cuadro 2.13 se muestran valores de coeficiente de pérdidas según accesorios:

Cuadro 2.13. Pérdidas locales por accesorios.

Accesorio	K
Codo de 90°	0,9
Codo de 45°	0,42
Válvula de compuerta	0,19

2.6.7 Diámetro de la tubería del lateral

En general el problema consiste en saber cuál es el diámetro de la tubería a utilizar, por lo que si se conoce las máximas pérdidas de carga que su puede dar en el lateral, de la fórmula de Hazen Williams se despeja el diámetro y se calcula este, ver ecuación 39:

$$D = \left(\frac{1,131 \times 10^9 \times Q^{1,852} \times L \times F}{h_f \times C^{1,852}} \right)^{0,20525} \dots\dots\dots(39)$$

D = Diámetro de la tubería del lateral (mm).

Q = Caudal de la tubería (m³/h).

h_f = Pérdidas en la tubería (m/m).

C = Coeficiente de Hazen Williams según el tipo de material.

F = Factor según el número de salidas.

2.6.8 Pérdidas admisibles según el lateral

Las pérdidas máximas admisible va a depender de la posición del lateral, ya sea cuesta arriba, abajo o a nivel.

2.6.9 Lateral colocado a nivel

Si el lateral se ubica en un terreno sin pendiente y lo máximo que quiere perder es un 20% entonces se aplica la ecuación 40:

$$P_{ad} = 0,2 \times P_0 \dots\dots\dots (40)$$

Pad= Pérdidas admisibles.

P0= Presión media de operación del aspersor.

2.6.10 Lateral colocado hacia arriba

Si el lateral se va a ubicar sobre la pendiente y el agua tiene que llegar hasta a la parte más alta, y se quiere perder un 20% , se aplica la ecuación 41:

$$P_{ad} = 0,2 \times P_0 - \Delta Z \dots\dots\dots (41)$$

Pad= Pérdidas admisibles.

P0= Presión media de operación del aspersor.

2.6.11 Lateral colocado hacia abajo

Si el lateral se va a ubicar sobre la pendiente y el agua tiene que llegar hasta a la parte más baja, y se quiere perder un 20%, se aplica la ecuación 42:

$$P_{ad} = 0,2 \times P_0 + \Delta Z \dots\dots\dots (42)$$

Pad= Pérdidas admisibles.

P0= Presión media de operación del aspersor.

2.6.12 Calculo de la presión en la entrada de la bomba

Si se conoce la presión que trabaja el aspersor y se conocen las pérdidas en el sistema, se puede usar la ecuación de la energía para estimar la presión en la tubería:

$$P_e = P_o + (\Delta Z) + h_c + h_f + h_s \dots \dots \dots (43)$$

Donde:

P_e = Presión en la entrada de la tubería (m.a.c)

P_o = Presión de operación del cañón (m.a.c)

ΔZ = diferencia de altura a superar (m)

h_c = Altura de la base del cañón (m)

h_f = pérdidas totales en la tubería (m/m)

h_s = pérdidas totales en los accesorios (m/m)

2.6.13 Combinación de diámetro en tuberías sin salidas múltiples

Según Villalobos (2009), esto se debe hacer, cuando es necesario llegar con cierta presión a un determinado punto o cuando se requiere que se consuma toda la carga disponible que se tenga. La combinación de diámetros es necesaria ya que como se sabe en el mercado solo existen ciertos diámetros que se fabrican en forma comercial, por lo que muchas veces se debe recurrir a combinarlos para tener las presiones que se requieren en los diseños. El procedimiento a llevar a cabo es el siguiente:

- a. Se debe conocer la longitud de la tubería y el caudal a transportar.
- b. Se dispone de la máxima pérdida de carga que se puede tener.
- c. Con lo anterior se escoge el diámetro que daría la pérdida exacta a la admisible. Esto se puede hacer mediante la fórmula de Hazen Williams.
- d. En las tablas de tuberías comerciales, se escoge el diámetro inmediatamente superior e inferior que se fabrique.
- e. Se calcula la pérdida por fricción en m/m para ambos diámetros; con los datos de caudal, longitud de tubería que se tiene. Es lógico que el diámetro menor dará una pérdida por fricción mayor a la admisible, por lo que se puede llevar a cabo una

combinación de diámetros que de la pérdida admisible exacta, colocando un tramo de una tubería de un diámetro mayor y otro del diámetro menor.

Con la información anterior se introducen los datos en la ecuación 44:

$$h_{f1} \times X + h_{f2}(L - X) = h_f \dots \dots \dots (44)$$

Donde:

h_{f1} = Pérdidas en la tuberías en el diámetro 1.

h_{f2} = Pérdidas en la tuberías en el diámetro 2.

X = Tramo que se colocará con diámetro 1.

L - X: Tramo que se colocará con diámetro menor 2.

En la figura 2.15 se observa un esquema de la combinación de tuberías para el cálculo de las pérdidas:

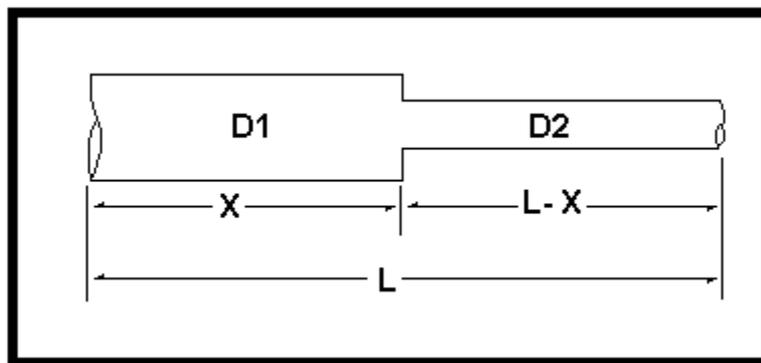


Figura 2.15. Combinación de diámetros.

2.6.14 Cálculo del diámetro de la tubería principal

Villalobos (2009), indica que existen diferentes formas para calcular el diámetro de la tubería principal, en ocasiones se tienen ciertas cargas disponibles que lo que podría hacer es colocar diámetros pequeños que permitan pérdidas por fricción altas. En caso

contrario sería que la diferencia de carga es pequeña por lo que se debe de hacer es colocar diámetros grandes para que las pérdidas por fricción sean mínimas.

Cuando se debe colocar un sistema de bombeo, se debe asegurar que exista un equilibrio entre los costos del bombeo y los costos de las tuberías. Si se colocan diámetros de tubería muy grandes, el costo de la tubería será alto, sin embargo, el costo por bombeo anual será pequeño. Por el contrario, si los diámetros son pequeños se darán costos de tuberías bajos pero los costos por bombeo son altos (Villalobos, 2009).

2.6.15 Método de la carga unitaria

El método consiste en seleccionar que la tubería principal tenga pérdidas de 2,3 m por cada 100 metros de longitud de tuberías. Este límite da como resultado que algunas veces se coloquen diámetros un poco “grandes”, de todas formas, en una instalación, también se debe tener en cuenta el costo del equipo así como de que no se produzcan velocidades superiores a límites también establecidos (Villalobos, 2009).

Con la ecuación de Hazen Williams conociendo las pérdidas admisibles se calcula el diámetro, ver ecuación 45:

$$D = \left(\frac{1,131 \times 10^9 \times Q^{1,852} \times L}{0,023 \times C^{1,852}} \right)^{0,20525} \dots\dots\dots(45)$$

D= Diámetro de la tubería del lateral (mm).

Q= Caudal de la tubería (m³/h).

C= Coeficiente de Hazen Williams según el tipo de material.

2.6.16 Método de velocidad permisible

Según Villalobos (2009), existen velocidades máximas que se admiten en la circulación del agua en las tuberías. Generalmente estas velocidades se recomiendan por problemas que se pueden presentar cuando hay una interrupción brusca del flujo, lo cual puede provocar el golpe de ariete.

Comúnmente se establecen valores comprendidos entre 1,5 y 3 m/s como máximo. En forma general se recomiendan 1,5 m/s para evitar golpes de ariete. Si se establece

previamente el valor de la velocidad máxima, se puede calcular el diámetro requerido con la ecuación 46:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{v \times \pi}} \dots \dots \dots (46)$$

D= Diámetro en (m).

Q= Caudal en (m/s).

V= Velocidad admitida en (m/s).

2.6.17 Método del porcentaje de presión

Con este método lo que se busca es no tener una pérdida superior de un porcentaje establecido de la presión de operación del aspersor en la tubería principal. El porcentaje que se toma comúnmente es entre el 10 y 20% de la presión de operación. Generalmente se toma un valor de 15% (Villalobos, 2009).

2.6.18 Cálculo del sistema de bombeo

De acuerdo con Villalobos (2009), para seleccionar el equipo de bombeo se debe conocer el caudal total del sistema, así como la carga dinámica que se tiene. La carga dinámica depende de la presión a la entrada del lateral, pérdida por fricción en la tubería principal. Diferencia de altura entre el espejo de agua y el punto más alejado que se pretende poner bajo riego, pérdidas secundarias, teniendo estos datos empleamos la ecuación 47:

$$HPb = \frac{Q \times CDT}{270 \times Eb} \dots \dots \dots, (47)$$

Donde

HPb = potencia requerida en bomba, en CV.

Q = caudal del sistema, en m³/ h.

CDT = carga dinámica total de bomba, en m.c.a.

Eb = eficiencia de la bomba, en decimal.

III. METODOLOGÍA

3.1 Características generales y levantamiento topográfico

Realizar un recorrido del área en estudio para conocer a nivel macro las características generales del terreno.

Hacer una demarcación de la zona en estudio, primero se hace con un GPS para procesar la información en ArcGis, con el fin de obtener una fotografía satelital del terreno donde se muestre el área, además obtener la cantidad de superficie a regar y delimitar el terreno.

Hacer un levantamiento del terreno por medio de un GPS submétrico, con el objetivo de obtener un plano a curvas de nivel. Es importante hacer el levantamiento en un día despejado para obtener buena precisión en los resultados. Igualmente, se debe señalar el lugar donde se tomó el punto, para hacer repeticiones de las lecturas, que puede ser tres o más puntos, con el fin de verificar si los datos son confiables, y observar cuanto varía de un día para otro. El GPS submétrico que se utilizó se muestra en la Figura 3.1:



Figura 3.1. GPS submétrico.

Para lograr el plano a curvas de nivel, se debe hacer en la medida de lo posible cuadrículas de 25 por 25. Procesar la información en ArcGis que permite diseñar un plano con curvas a nivel cada metro, con el objetivo de que el mapa quede detallado y poder determinar la pendiente promedio y las alturas del terreno.

3.2 Diseño agronómico

Realizar calicatas en el área de estudio, para observar las capas del suelo, ver las condiciones del terreno y determinar en forma general algunas características físicas.

Al ser 11 hectáreas, en conjunto con el Departamento de Investigación se decidió hacer 4 calicatas, sobre la pendiente del terreno. Las calicatas se van hacer con palas por la dificultad de ingresar con maquinaria.

También, a través de las calicatas se pretende observar el comportamiento de las raíces en el suelo y sacar muestras de suelo para llevarlas al laboratorio y hacer los análisis que ayuden a obtener el diseño agronómico, por lo tanto, es necesario realizar el análisis físico del suelo y datos meteorológico:

3.2.1 Análisis físicos del suelo

Extraer muestras de suelo con cilindros especiales para determinar en el laboratorio características físicas de suelo.

En el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería Agrícola, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se determinó capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), mediante el método de ollas de presión (Figura 3.2).



Figura 3.2. Ollas de presión para determinar CC y PMP.

Para obtener CC, lo primero que se hizo fue saturar las muestras por 24 horas, posteriormente, se colocaron las muestras en las ollas para someterlas a una presión de

0,33 atmósferas durante 48 horas. Después, se pesaron las muestras para obtener el peso de suelo húmedo a capacidad de campo.

Para PMP, se hizo lo mismo que en el procedimiento anterior. Sin embargo, las muestras deben someterse a una presión de 15 atmósferas.

Una vez que se obtenga el peso de suelo húmedo a CC y PMP, se colocaron las muestras en un horno a 105° C por 24 horas, para obtener el peso de suelo seco. Los límites de humedad aprovechable se calculan con las ecuaciones 17 y 19.

El peso específico aparente se estimó con la ecuación 6, para ello se llevaron las muestras de suelo al laboratorio, en cilindros especiales de 5 cm de diámetros y 5,5 cm de altura, cabe mencionar que las muestras de suelo se tomaron a diferentes profundidades.

Con base a los análisis físicos del suelo, y de acuerdo a las observaciones del sistema radicular, se estableció que la profundidad radicular efectiva es de 40 cm y por recomendación del Departamento de Investigación se asumió un agotamiento del 50% con estos datos se calculó la lámina neta con la ecuación 25.

Con la lámina neta y asumiendo la eficiencia de riego del 75% se estimó la lámina bruta con la ecuación 26.

3.2.2 Datos meteorológicos

El Departamento de Investigación de la compañía son los encargados de manejar los datos meteorológicos de la zona, por esta razón se les consultó la velocidad del viento y la evapotranspiración real, que utilizaron para calcular la frecuencia de riego con los cañones que tienen actualmente.

Una vez que se calculó la lámina neta y con la evapotranspiración real, se determinó la frecuencia de riego con la ecuación 27.

Además, se hicieron pruebas de infiltración en el campo por medio de cilindros infiltrómetros, para obtener la infiltración básica del suelo, con la ecuación 14. Los cilindros se enterraron a una profundidad de 10 cm. El cilindro de mayor diámetro siempre se mantuvo lleno con agua, en el cilindro de menor diámetro se estableció una

carga contante de agua para realizar las medidas. Fue necesario llevar un cronómetro para determinar el tiempo y una regla para estimar la lámina que se infiltraba. En la Figura 3.3 se muestra los cilindros utilizados para realizar las pruebas de infiltración



Figura 3.3 Cilindros infiltrómetros

De las pruebas de infiltración realizadas en el campo se estimó la infiltración básica del suelo y se castigó por un factor que depende la pendiente, el valor del factor se puede ver en el Cuadro 2.7.

Una vez que se determina la infiltración básica se puede escoger de catálogos un aspersor gigante que se adapte a las condiciones del terreno. El Departamento de Ingeniería, facilitó el catálogo de un fabricante con quien ya han tenido experiencia, sobre la compra de cañones de riego.

Con la ecuación 29, se puede estimar la velocidad de avance de la máquina para que deje la lámina requerida. Una vez que se calcula a velocidad de avance se puede determinar el tiempo de riego al inicio y final de la banda, con las ecuaciones 30 y 31, respectivamente. El radio mojado se obtiene de los catálogos que dan por los fabricantes, y el ángulo de riego recomendado está entre 200° .

Con base a los datos anteriores se puede calcular el tiempo de riego total, mediante la ecuación 32.

3.3 Trazo de la tubería en el campo

Con el plano a curvas de nivel y un GPS, se fue al campo para georeferenciar el camino por donde pasaría la manguera enrollable, puntos donde se colocarían el cañón, y detalles de los obstáculos o impedimentos para el movimiento de la máquina. Además, se hizo un simulacro de cómo sería el riego con el cañón, para determinar los sectores donde se va a colocar el cañón para que realice el riego de toda el área, también es necesario para conocer las cuotas a las que estaría el cañón.

Posteriormente, se buscó un sitio por donde pasaría la tubería principal, para hacer un perfil del terreno con un distanciómetro láser (ver Figura 3.4), con el fin de estimar longitud de la tubería. Además, comparar si las alturas tomadas con el GPS submétrico y el distanciómetro son aproximado. Asimismo, se debe georeferenciar el trazo de la tubería principal desde la fuente de agua hasta la altura más crítica y el punto más bajo, con un GPS.



Figura 3.4. Distanciómetro láser.

3.4 Diseño hidráulico

Según el Departamento de Ingeniería de la compañía, se debe seleccionar un aspersor del catálogo de un fabricante conocido por la compañía, por el tamaño del área la máquina tiene que ser capaz de regar toda el área en tan solo un día.

Con base al caudal con que trabaja el sistema y asumiendo una velocidad recomendada por el Departamento de Ingeniería, se puede estimar el diámetro de la tubería con la ecuación 46

Al conocer el diámetro de la tubería, la longitud que se ocupa y la cantidad accesorios requeridos, se puede calcular las pérdidas que se producen. Con la ecuación 36 se calculan las pérdidas primarias, el coeficiente de Hazen-Williams se busca en el Cuadro 11. Las pérdidas secundarias se pueden calcular por medio de la ecuación 38. También, es necesario considerar las pérdidas que ocurre en la tubería de polietileno, para ello es necesario considerar la diferencia de altura entre el cañón y el tambor donde va enrollada la manguera, además, de la altura de la base del aspersor, con el objetivo de determinar la presión real que se requiere en la máquina para que el agua llegue a la presión de operación que recomienda el catálogo.

El diseño hidráulico se va hacer desde el punto más alto donde se va a colocar el aspersor gigante hasta la fuente de agua. Además, se va a comparar la diferencia de presiones que existiría en la máquina, cuando el cañón esté en el punto más bajo.

Teniendo la presión que requiere el aspersor gigante para su funcionamiento, las diferencias de altura entre la fuente de agua y el cañón, las pérdidas total en el sistema de tubería y sabiendo que no hay cambio de sección en la tubería (por lo que se considera que la velocidad es una constante), se calcula la presión que se debe tener en la entrada de la tubería principal para que el agua llegue al punto crítico, con la ecuación 43. Con la carga dinámica total del sistema se estima la potencia que requiere la bomba con la ecuación 47.

El análisis económico del proyecto, se hizo con base a la experiencia adquirida por el Departamento de Ingeniería, en la compra de cañones de riego.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Características generales y levantamiento topográfico

Del recorrido se observó que el terreno posee pendientes muy pronunciadas. Además el lugar estaba cultivado. Se tiene acceso a través de caminos que, por efecto de la lluvia y el paso de tractores no están en buenas condiciones. En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo de las condiciones de las pendientes del área a regar:



Figura 4.1. Características del área que se va a regar.

En la Figura 4.2 se observa que, alrededor del área en estudio pasan canales de drenaje que recolectan el exceso de agua que ocurre durante la estación lluviosa, y un canal que abastece de agua para realizar riego de las zonas aledañas.



Figura 4.2. Canal de riego que pasa por el área de estudio.

En la Figurara 4.3 se observa el área delimitada, la superficie del terreno mide aproximadamente 110 000 m² (11 ha):

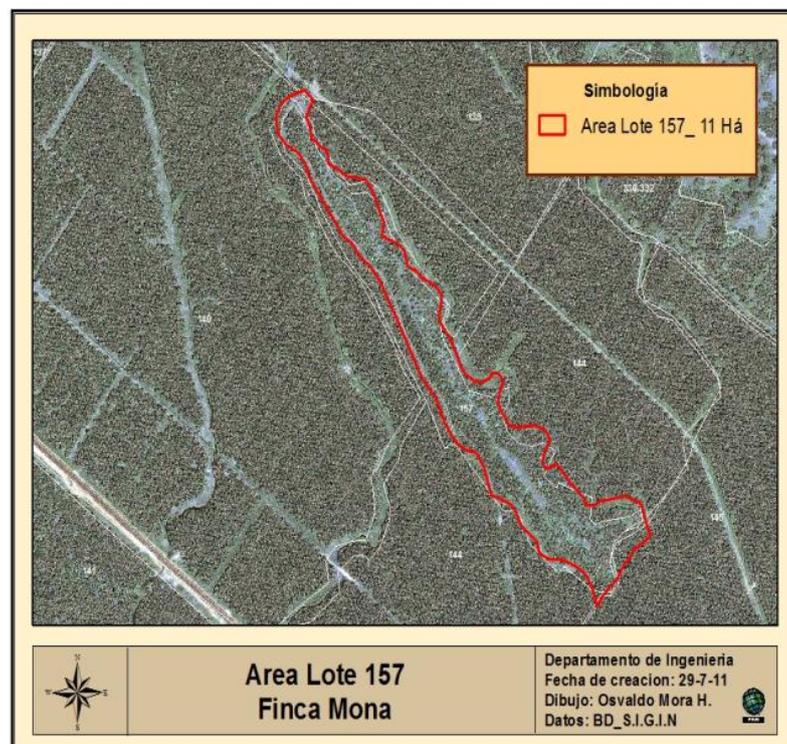
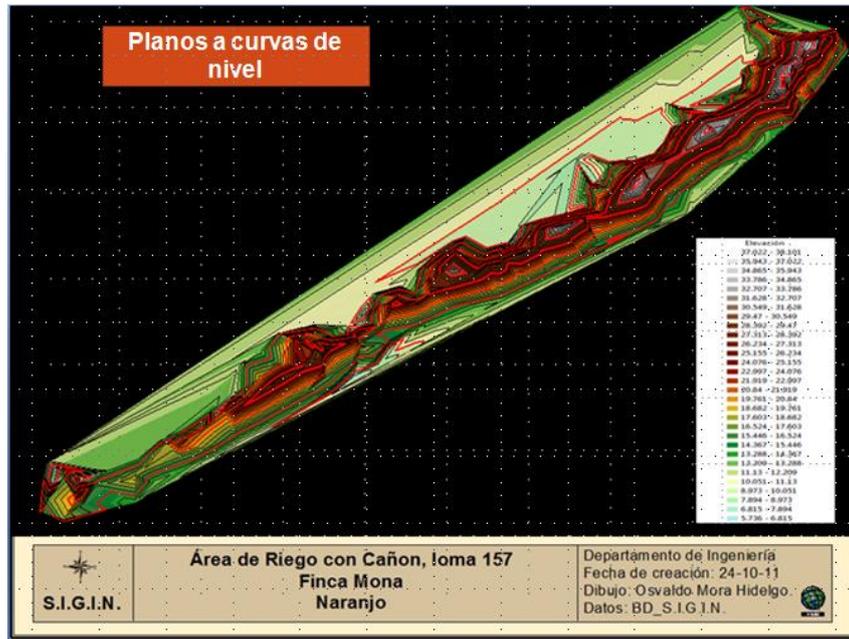


Figura 4.3. Delimitación del área de estudio.

En la Figura 4.4 se muestra el plano a curvas de nivel obtenido con el GPS submétrico y ArcGis, en la imagen se muestra las diferentes alturas del terreno:



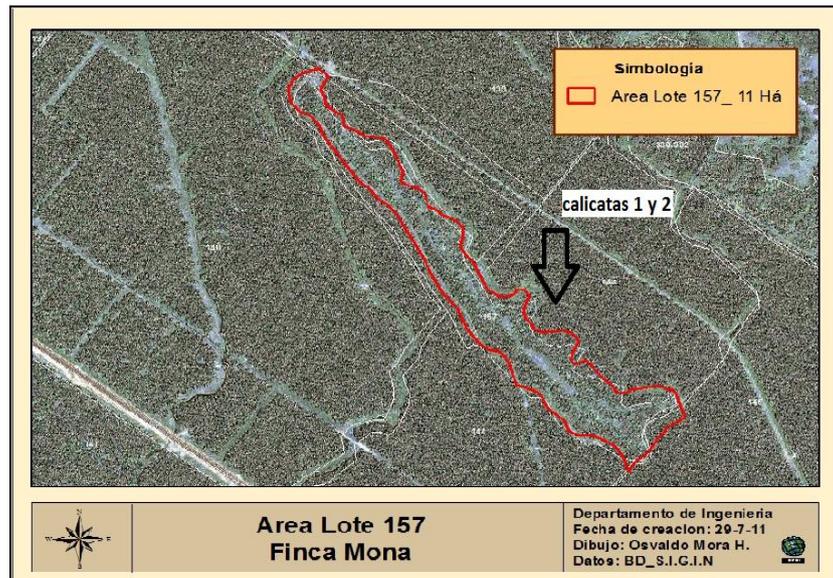
ArcGis

Figura 4.4. Plano a curvas de nivel

Del plano a curvas de nivel se obtuvo que la pendiente promedio en el área es aproximadamente de 24 por ciento, altura máxima del área es de 37 m. Sin embargo, solo interesan las alturas de los caminos por donde transitará la máquina que lleva el cañón de riego y las cuotas del sitio donde se colocará la tubería principal y la manguera de polietileno.

4.2 Diseño agronómico

Según el muestreo con el barreno, se eligió dos sectores para hacer las calicatas, las cuales se denominaron Zona 1 y Zona 2. En la Figura 4.5 se muestra la Zona 1:



ArcGis

Figura 4.5: Zona 1 donde se realizaron las calicatas 1 y 2.

En la zona 1 se hicieron dos calicatas, que miden aproximadamente 9 m de largo, y se hicieron sobre la pendiente del terreno, como se muestra en la Figura 4.6:

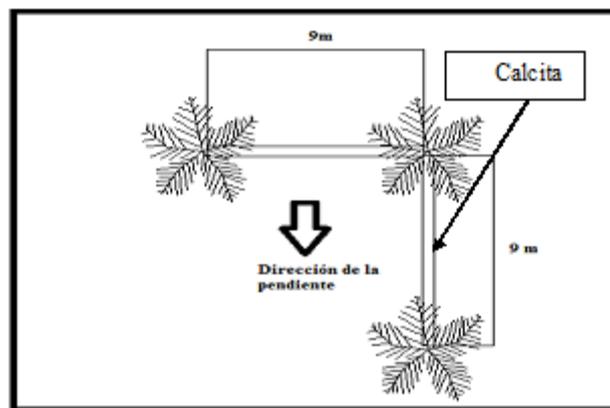


Figura 4.6. Esquema de cómo se hicieron las calicatas en la Zona 1.

En la Zona 1, lo primero que se observó fue una capa de suelo que medía 50 cm, es un relleno, producto del material que se depositó sobre la pendiente del terreno, por la construcción de los caminos. Posiblemente, esto haya compactado el suelo original en esa zona.

En el primer horizonte el crecimiento de las raíces son prácticamente nulas. Después del relleno hay una capa fértil o segundo horizonte que mide

aproximadamente 10 cm, y de un color café claro. Luego se ve un tercer horizonte de color amarillo con rojo, el cual está formado de un material duro pero frágil, con poca presencia de raíces.

De las investigaciones que ha hecho el Departamento de Investigación de la compañía, se ha determinado que el suelo es Ultisol, este se caracteriza por presentar un color rojo con un pardo claro y en otros sitios es pardo oscuro, estas características coinciden con lo observado en el campo. Además se puede ver la presencia de roca meteorizada.

También, cabe mencionar que el Ultisol es característico de zonas donde las épocas de lluvia son largas pero predominan estaciones secas, tal y como ocurre en la zona sur del país. En la Figura 4.7 se observa las capas del suelo de la zona 1:

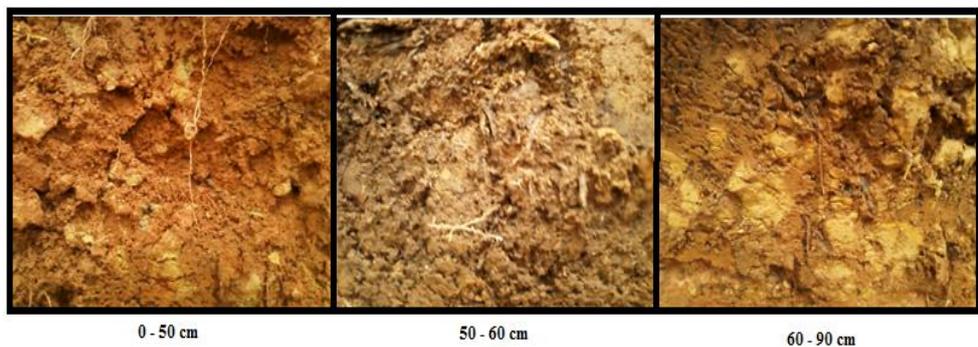


Figura 4.7. Capas del suelo en la zona 1.

Con respecto al comportamiento de las raíces, más que todo se observaban en la segunda capa. Se extendían de 2 a 3 m, y debido a la inclinación tienden a desarrollarse en mayor cantidad a favor de la pendiente y perpendicular a la pendiente. En contra de la pendiente se observó menor cantidad de raíces. En la Figura 4.8 se observa el comportamiento que tiene las raíces en el terreno de la Zona 1:

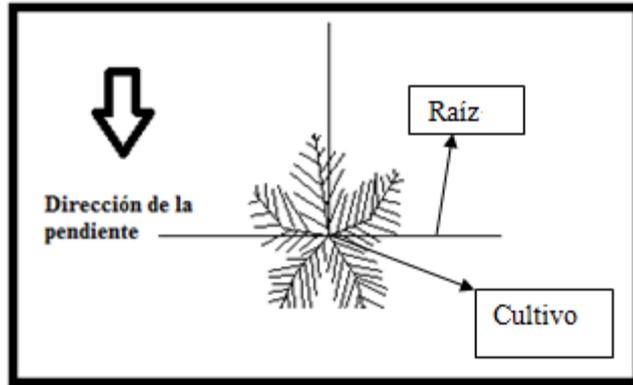


Figura 4.8. Esquema del comportamiento de las raíces en el área.

En la Figura 4.9 se observa que la mayor cantidad de raíces se desarrollaban en la segunda capa, por su condición este parece ser el suelo original del terreno antes de que le callera el material:

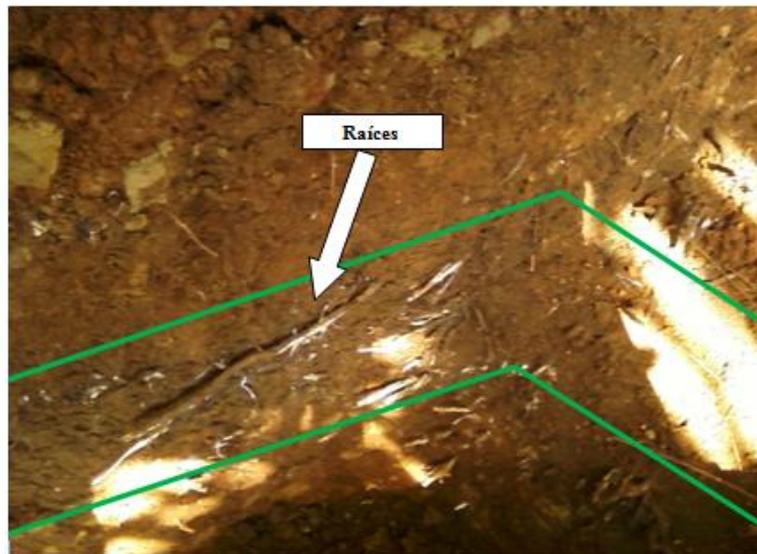
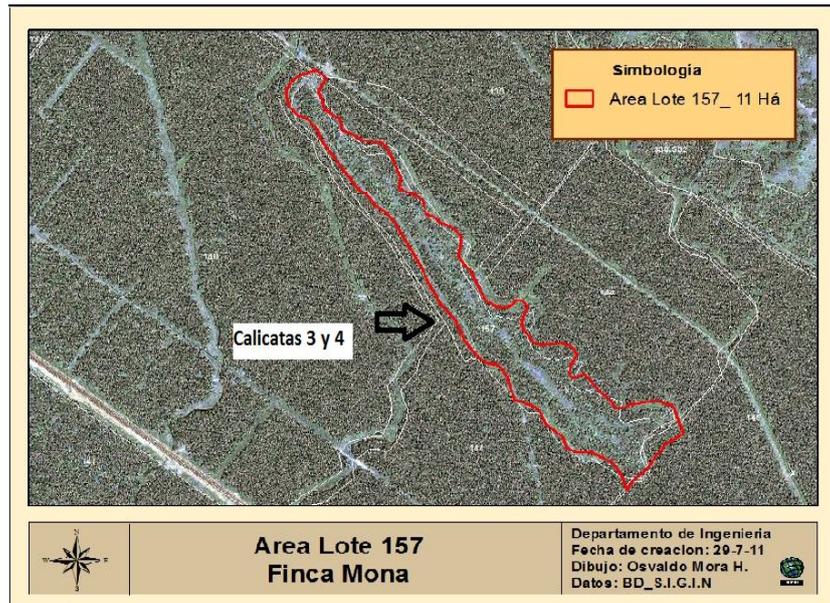


Figura 4.9. Desarrollo radicular en la Zona 1.

El segundo sector donde se hicieron las otras dos calicatas, de la misma forma que se hizo en la Zona 1, se observa en la Figura 4.10:



ArcGis

Figura 4.10. Zona 2 donde se hicieron las calicatas 3 y 4.

Las capas del suelo en la zona 2 se ve en la Figura 4.11, el suelo es más oscuro con moteados amarillentos y presentaban algunas rocas que se podrían pulverizar fácilmente con la mano. A diferencia de la Zona 1, esta no tiene material de relleno:

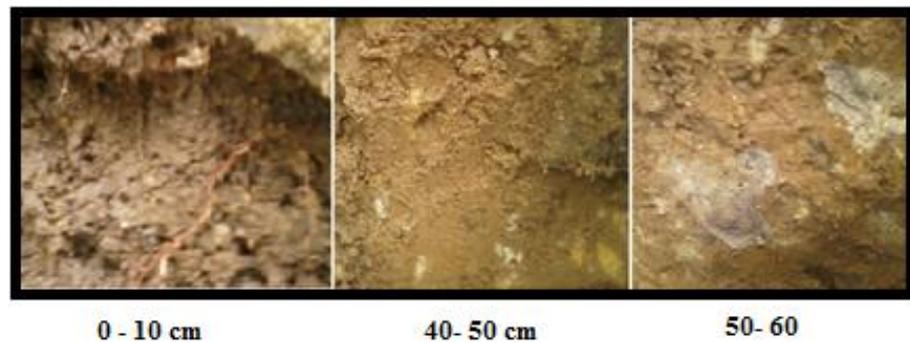


Figura 4.11. Capas del suelo en la Zona 2.

En la Zona 2, en la Figura 4.12 se observa la profundidad efectiva de las raíces estaba entre 40 y 50 cm, se desarrollaban de igual manera que en la Zona 1, como se mostró anteriormente en la Figura 4.8:



Figura 4.12. Comportamiento de las raíces.

Si comparamos la Zona 1 con la Zona 2, se presentan diferencias en cuanto a cobertura vegetal, en la Zona 2 se presenciaba mayor cantidad de rocas, como se ve en la Figura 4.13

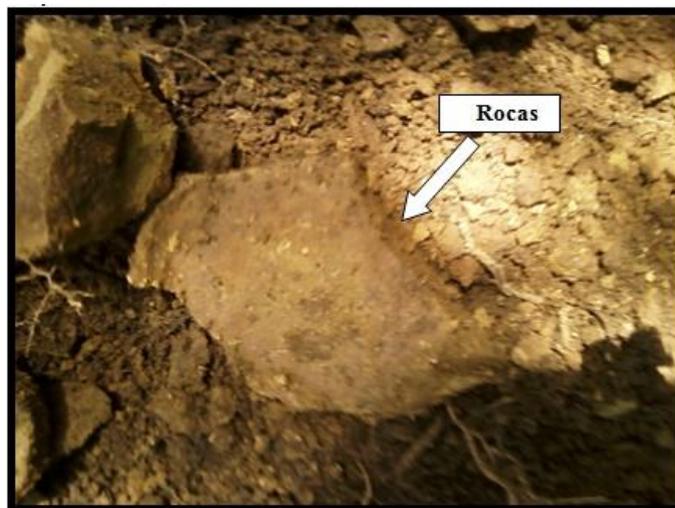


Figura 4.13. Presencia de rocas en la Zona 2.

En la Zona 2 se tomaron muestras de suelo a los 40 cm de profundidad. En la Zona 2 se intentó extraer muestra a los 60 cm de profundidad, sin embargo, en la primera capa fue difícil de extraer las muestras porque era un material muy inestable, por lo que las pruebas se realizaron a partir de la segunda capa del suelo.

De las pruebas hechas con las ollas de presión se obtuvieron los valores, que se muestra en el Cuadro 4.1:

Cuadro 4.1. Valores obtenidos con ollas de presión.

Datos		Capacidad de campo		Punto de Marchitez Permanente	
Zona	Profundidad (cm)	Peso de suelo húmedo (g)	Peso de suelo seco (g)	Peso de suelo húmedo (g)	Peso de suelo seco (g)
1	0-32	47	33	40	32,56
	32-52	43	29	36	29,35
2	0-10	42	33	37	32,9
	10-40	48	36	41	35,87

Empleando las ecuaciones 17 y 19, se obtuvo el Cuadro 4.2:

Cuadro 4.2. Porcentaje de humedad con base a suelo seco.

Zona	Profundidad (cm)	CC (%)	PMP (%)	Agua útil
1	0 -32	45,480	22,022	23,46
	32-52	47,620	23,122	24,50
2	0-10	27,816	13,009	14,81
	10-40	32,520	15,412	17,11

Cabe mencionar que el agua aprovechable depende la textura del suelo, por lo tanto, en el Cuadro 4.3 se muestran la textura del suelo en el área de estudio, obtenido mediante el método de Bouyoucos:

Cuadro 4.3. Datos obtenidos con la prueba de Bouyoucos.

Zona	profundidad (cm)	lectura a los 40 segundos	Lectura a las 2 horas	Peso de la muestra (g)	% de arena	% de limo	% de arcilla	Textura
1	0 -32	32,00	23,00	40,07	20,14	22,46	57,40	arcillosa
	32-52	30,00	27,00	40,23	25,43	7,46	67,11	arcillosa
2	0 - 10	15,00	14,00	40,38	62,85	2,48	34,67	arcillo arenoso
	10 - 40	20,00	16,00	40,13	50,16	9,97	39,87	arcillo arenoso

Según la literatura, los porcentajes de humedad a capacidad de campo para un suelo arcilloso están comprendidos entre 31% y 39% y entre 27% y 35% para un suelo arcilloso arenoso. El porcentaje de humedad a punto de marchitez permanente es de 15% a 19% para textura arcillosa y de 13% a 17% para suelos arcilloso arenoso, por lo tanto si comparamos los datos teóricos con los obtenidos en el campo, los mismos se aproximan a la teoría.

En el Cuadro 4.4 se observan los resultados del peso específico, obtenidos en el laboratorio:

Cuadro 4.4. Datos del peso específico en el suelo de la Zona 1 y Zona 2.

Datos	Profundidad (cm)	Peso o suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Volumen total (cm ³)	Peso específico aparente (g/cm ³)
Zona 1	0 - 32	149,80	98,80	118,73	0,83
	32 - 52	156,30	98,80	118,73	0,83
Zona 2	0 - 10	168,00	117,30	118,73	0,99
	10 - 40	160,50	110,90	118,73	0,93

La determinación del peso específico aparente del suelo es básica para calcular la lámina de riego, los valores del suelo en ambas zonas son menores a 1 g/ cm³, la teoría indica que los suelos arcillosos tienen valores de peso específico aparente está entre 1,20 y 1,30 g/cm³, y son valores para un suelo arcilloso, que se caracterizan por retener

mucha humedad pero poco aprovechable por la planta. En el caso de la Zona 1, puede haber síntomas de compactación por tratarse de valores bajos. Sin embargo, en la zona 2 el peso específico aparente es un poco mayor porque el suelo contiene partículas de arena.

La lámina neta de la Zona 1 y Zona 2 se muestra en el Cuadro 4.5:

Cuadro 4.5: Valores de lámina neta.

Zona	Profundidad (cm)	Lámina Máxima (cm)	Lámina Neta (cm)	Lamina neta total (cm)
1	10- 32	6,25	3,12	3,94
	32- 52	1,63	0,82	
2	0 – 10	1,46	0,73	3,13
	10 - 40	4,79	2,40	

Para satisfacer las necesidades del cultivo en el área y para efectos de diseño se escogió una lámina neta de 3 cm. Pero, como en todo sistema de riego hay pérdidas, se decide aplicar una lámina bruta de 4 cm.

Según el Departamento de Investigación para riego con cañón, se estableció que la una evapotranspiración real diaria para los mese más críticos es de 3 mm/día y se obtuvieron con tanques evaporímetros, este valor a dado buenos resultados. Además, según ellos, este dato ha sido corroborado con la estación meteorológica y tensiómetros, en los diferentes experimentos que han realizado en la zona.

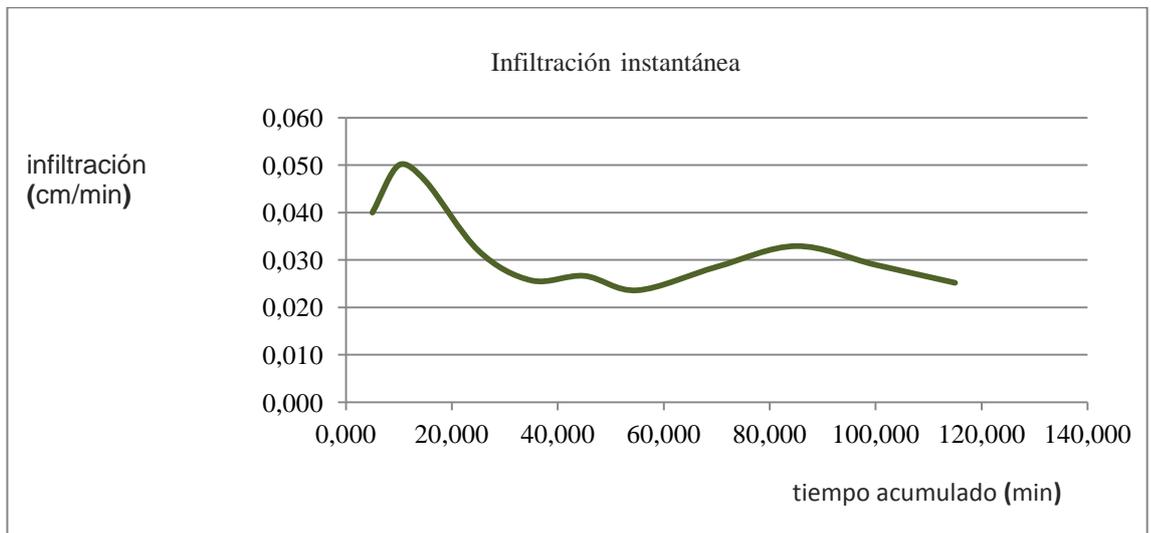
Si la lámina neta es de 30 mm y la evapotranspiración real es de 3 mm/día, entonces la frecuencia de riego es de 10 días.

De las pruebas que se hicieron con cilindros infiltrómetros se obtuvieron los datos del Cuadro 4.6. Con esta información se logra determinar la curva de infiltración instantánea y lámina acumulada para la Zona 1 y Zona 2.

Cuadro 4.6. Datos de infiltración en la Zona 1.

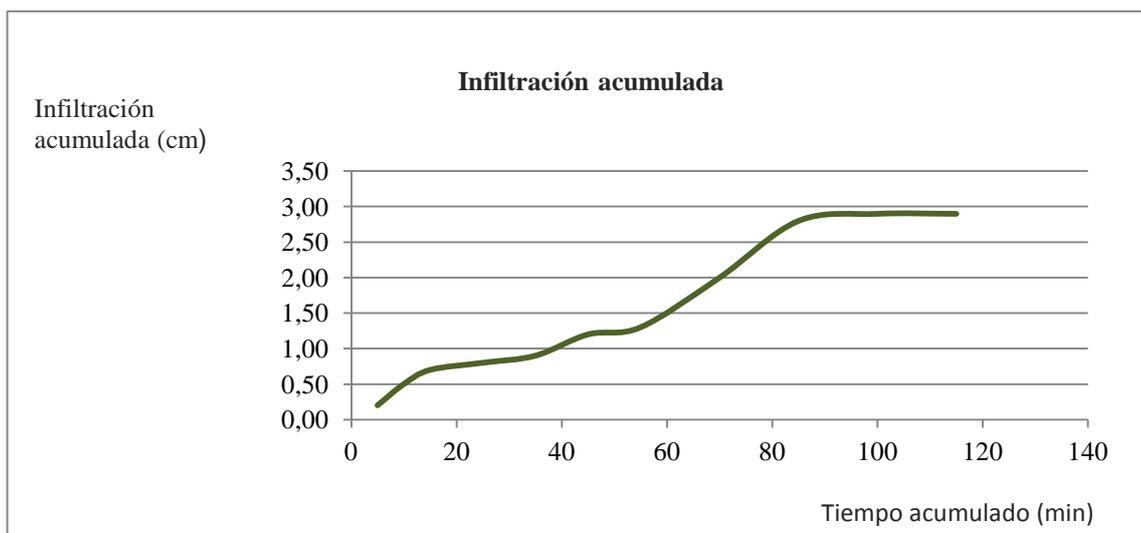
Tiempo acumulado (min)	Lámina acumulada (cm)	Infiltración (cm/min)
5	0,2	0,040
10	0,5	0,050
15	0,7	0,046
25	0,8	0,032
35	0,9	0,026
45	1,2	0,027
55	1,3	0,024
70	2,00	0,029
85	2,8	0,033
100	2,9	0,029
115	2,9	0,025

De los datos obtenidos, se debe considerar que el suelo estaba húmedo, porque 24 horas antes de hacerse la prueba se produjo un fuerte aguacero. Al ser un suelo arcilloso y compactado según el peso específico, se observa que la lámina que se infiltraba en el suelo es pequeña. Si graficamos los valores del Cuadro 4.6 obtenemos la Figuras 4.14 y la Figura 4.15:



Excel

Figura 4.14. Curva de infiltración instantánea en la Zona 1.



Excel

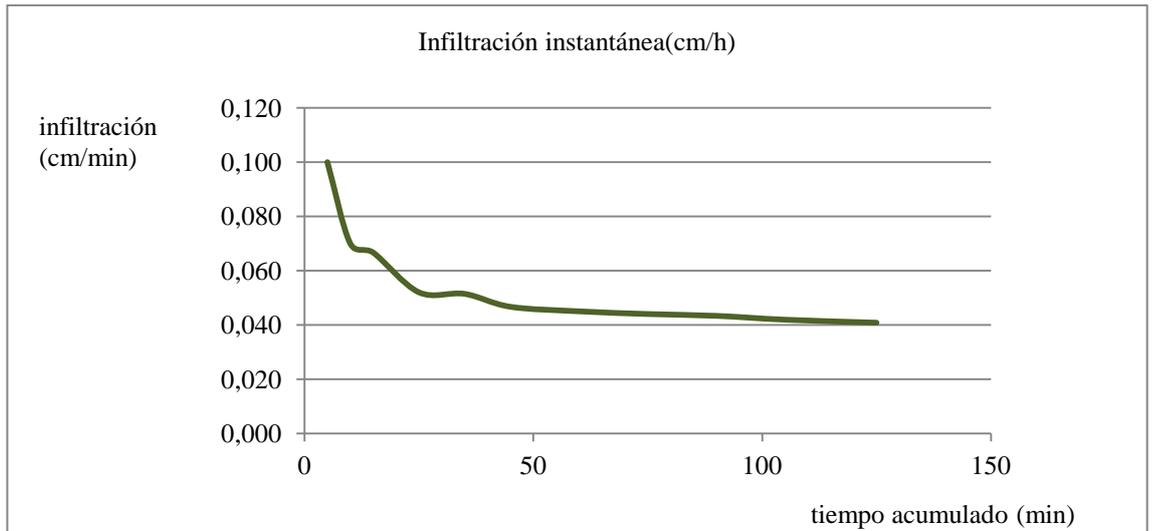
Figura 4.15. Curva de infiltración acumulada de la Zona 1.

Para la Zona 2 se obtuvo el Cuadro 4.7, el cual muestra los resultados de infiltración:

Cuadro 4.7. Datos de infiltración en la Zona 2.

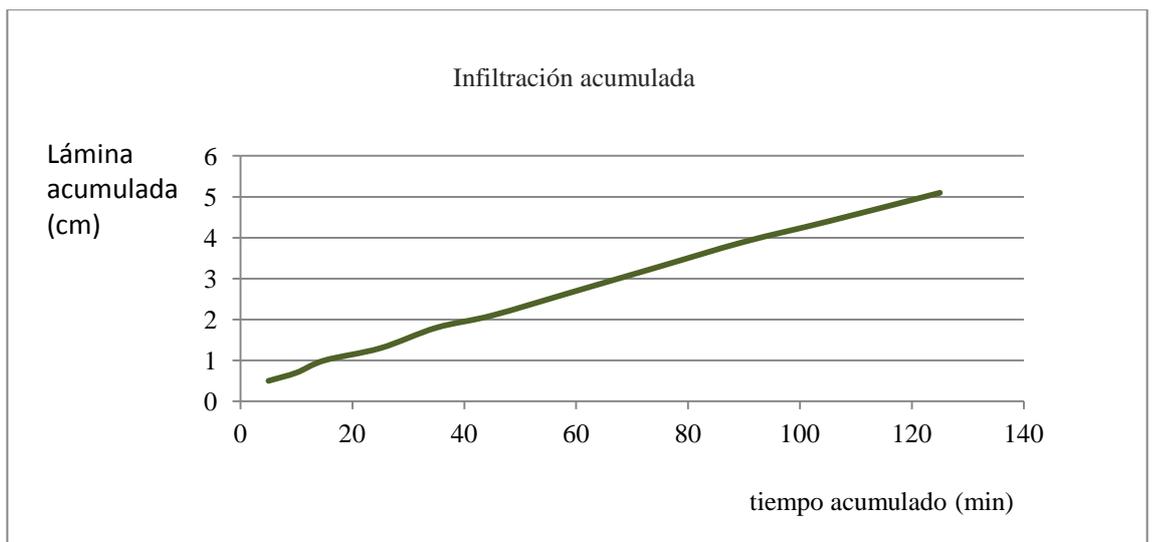
Tiempo acumulado (min)	Lectura (cm)	Infiltración (cm/h)
5,000	0,5	0,100
10,000	0,7	0,070
15,000	1	0,067
25,000	1,3	0,052
35,000	1,8	0,051
45,000	2,1	0,047
60,000	2,7	0,045
75,000	3,3	0,044
90,000	3,9	0,043
105,000	4,4	0,042
125,000	5,1	0,041

Del Cuadro 4.7 se obtienen las curvas de infiltración instantánea (Figura 4,15) y la infiltración acumulada (Figura 4.16).



Excel

Figura 4.15. Curva de infiltración instantánea en la Zona 2.



Excel

Figura 4.16. Curva de infiltración instantánea en la Zona 2.

Se generaron las ecuaciones para ambas zonas y se calcula la infiltración básica con la ecuación 14, este dato es importante para el diseño de riego con aspersión, ya que este dato proporciona la intensidad máxima que debe aplicar el aspersor para evitar pérdidas por escurrimiento, ver Cuadro 4.8:

Cuadro 4.8: Ecuaciones de infiltración e infiltración básica.

Datos	Infiltración Instantánea (cm/min)	Infiltración acumulada (cm)	Infiltración básica (mm/h)
Zona 1	$I_i = 0,062t^{-0,186}$	$I_{cum} = 0,076t^{0,814}$	15,48
Zona 2	$I_i = 0,1812t^{-0,26}$	$I_{acum} = 0,1812t^{0,74}$	29,24

Por las condiciones del terreno, la infiltración básica en la Zona 1 es menor por ser un suelo arcilloso y según las pruebas realizada presentan condiciones de un suelo compactado, por lo que para el diseño se escoge 29,24 mm/hora ya representa un dato más confiables y es representativo de toda el área, por no encontrarse alterado. Entonces, si el valor de la infiltración básica se corregida por un factor que depende de la pendiente, se obtiene que la intensidad que debe dar el cañón debe ser menor a 7,31 mm/h para evitar escorrentía.

En el Cuadro 4.9 se da un resumen de los valores del diseño agronómico:

Cuadro 4.9. Resumen de los valores para el diseño.

Datos	Valor
LN	30 mm
Lb	40 mm
Fr	10 días
Ib	29,24 mm/h
Ib*F(pendiente)	7,31 mm/h
Velocidad del Viento	2,5 km/h

El catálogo que se utilizó para seleccionar el equipo de riego se muestra en la Figura 4.17:

PERFORMANCE TABLE															
TRAVELER SERIES : 581				P.E. PIPE O.D. : 4.3"				P.E. PIPE I.D. : 3.7"				P.E. PIPE LENGTH : 720'			
110 GX 720						ABI irrigation <small>JANUARY 2008</small>		SPEED OF P.E. PIPE PULL IN METERS/HOUR							
								SPEED OF P.E. PIPE PULL IN FEET/HOUR							
PRESSURE		GUN: KOMET 160				15	20	25	30	40	50	60	100		
INLET PRESSURE (PSI)	NOZZLE PRESSURE (PSI)	NOZZLE SIZE (MM)	WATER FLOW (GPM)	SPRAY RANGE (FEET)	SPACING (FEET) 65%	ACRES PER PULL	50	65	80	100	130	165	195	325	
PRECIPITATION RATE IN INCHES															
72	60	25	211	167	300	5.9	1.4	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	
88	70	25 (0.98)	227	175	300	6.0	1.5	1.1	0.9	0.7	0.6	0.4	0.4	0.2	
102	80		243	182	300	6.0	1.6	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	
87	60	27.5	255	175	300	6.0	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	
99	70	(1.08)	275	185	300	6.0	1.8	1.4	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3	
112	80		294	192	300	6.1	1.9	1.5	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	
93	60	30	303	184	300	6.0	2.0	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.3	
106	70	(1.18)	328	195	330	6.7	1.9	1.5	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	
119	80		350	202	330	6.8	2.0	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.3	
100	60	32.5	356	193	330	6.7	2.1	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5	0.3	
116	70	(1.28)	384	203	330	6.8	2.2	1.7	1.4	1.1	0.9	0.7	0.6	0.3	
131	80		411	210	330	6.8	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9	0.7	0.6	0.4	
112	60	35	413	200	330	6.8	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9	0.7	0.6	0.4	
127	70	(1.38)	446	211	360	7.4	2.2	1.7	1.4	1.1	0.8	0.7	0.6	0.4	
143	80		476	218	360	7.5	2.6	2.0	1.6	1.3	1.0	0.8	0.7	0.4	
ESTIMATED TIME FOR COMPLETE WINDING IN HOURS >>							14.4	11.1	9.0	7.2	5.5	4.4	3.7	2.2	
Performance data has been obtained under ideal test conditions and may be adversely affected by wind, poor hydraulic entrance conditions or other factors. No representation regarding droplet condition, uniformity, application rate or suitability for a particular application is made herein.															

Figura 4.17. Catálogo seleccionado para escoger en sistema de riego

Con el catálogo seleccionado se escogió un sistema con las siguientes características, la presión que se requiere en la entrada de la máquina es de 78,8 m.c.a., para que en a la boquilla llegue una presión de 42,2 m.c.a. El caudal es de 94 m³/h, el sistema logra regar 2,75 hectáreas en 5.5 horas, dejando una lámina de 22.86 mm con una intensidad de 4.16 mm/h. El radio de humedecimiento es de 60 m.

Como la velocidad del viento es de 2, 5 km/h y el diámetro mojado es de 120 m, según el Cuadro 2.8 el espaciamiento entre cañones debe ser de 80 m aproximadamente. Según la ecuación 29 la velocidad de avance de la máquina debe de ser de 39 m/h.

Si la velocidad avance de la máquina es de 39 m/ h, entonces, el tiempo de riego al inicio de la banda es de 0.6 horas y al final de la banda es de 0.5 horas. Po lo tanto, si la manguera de polietileno es de 200 m y el radio mojado es de 60 m, el tiempo de riego para dejar la lámina de 30 mm es de 5 horas aproximadamente.

4.3 Trazo de la tubería en el campo

Se decide que el riego se debe dar desde la parte de arriba del terreno, ya que por ahí pasa un camino y es el sector que permite que se riegue la mayor cantidad de área, permite hacer la menor cantidad de movimientos de la máquina que abastece el cañón.

Sin embargo, por donde pasaría el cañón auto enrollable, hay lomos que puede afectar el riego, estos se muestra en las Figuras 18, esto lomos o limitantes que están a la par de los caminos por donde transitaría el cañón.



Figura 4.18. Lomos que pueden afectar el riego.

En las Figuras 19 y 20, se muestra el perfil de los obstáculos que puede interferir con el riego, ya que el agua expulsada puede pegar en las paredes de los lomos, se tomaron como referencias esos dos obstáculos por ser los más críticos.

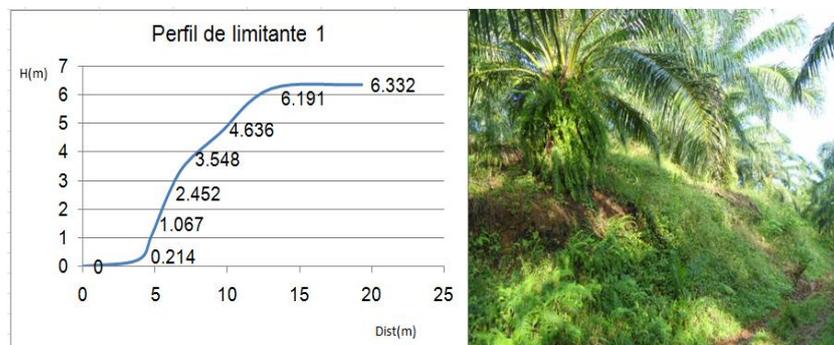


Figura 4.19. Perfil de la limitante 1 en el lote 157.

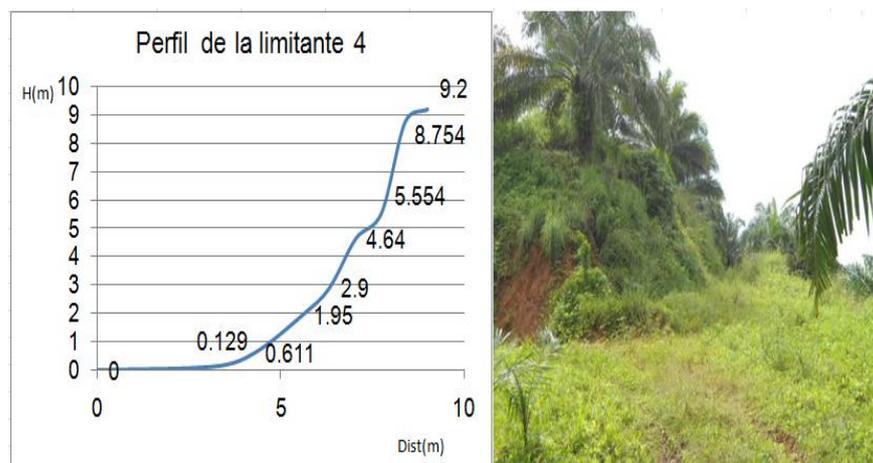


Figura 4.20. Perfil de la limitante 4 el lote 157.

Por otro lado, si estos dos obstáculos interfirieran con el riego, se pueden evitar ya que son tramos de 10 m que se quedarían sin regar. Sin embargo, el Departamento de Ingeniería ha hecho pruebas con diferentes cañones, y están de acuerdo que los 9 m de altura no son un obstáculo para que se dé el riego.

En la Figura 21 se muestra las limitantes o lomos georeferenciados, se puede ver los puntos donde se puede colocar el cañón, para que realice el riego:



ArcGis

Figura 4.21. Escenario teórico si se coloca el sistema de riego presurizado.

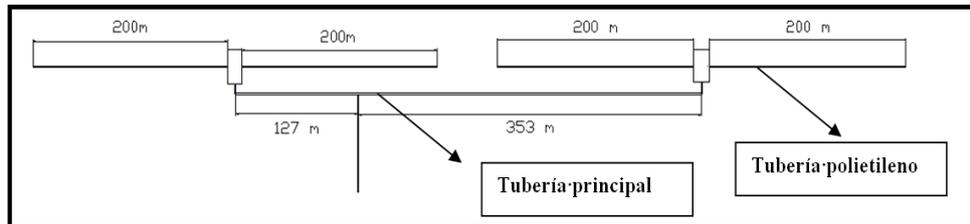
En la Figura 22, se muestra por donde pasaría la tubería principal para abastecer el cañón:



ArcGis

Figura 4.22. Ubicación espacial de la tubería.

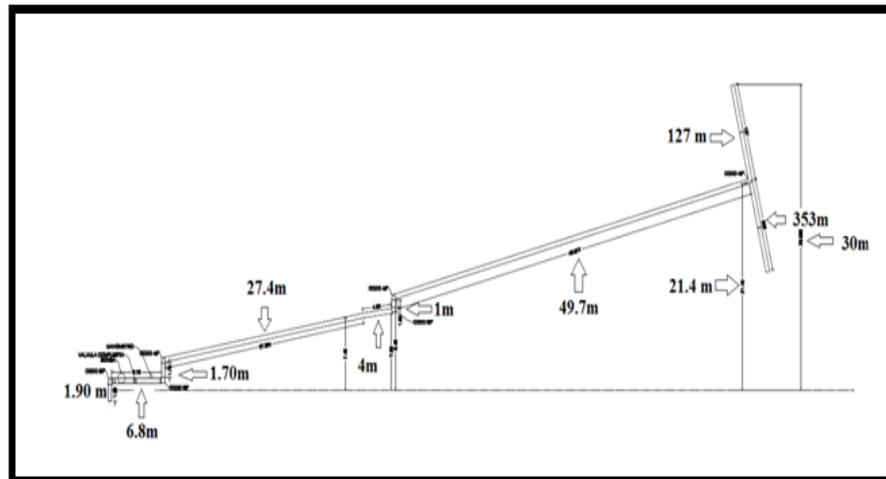
Se decide tomar la tubería que pasa por el centro del terreno, porque permite extenderse hasta el punto más alto donde se colocaría la máquina y un punto más bajo. Lo que se pretende es regar con una máquina, que se puede colocar en dos posiciones que permita regar toda el área, como se muestra en la Figura 22:



AutoCad

Figura 4.22. Esquema de la tubería vista en planta.

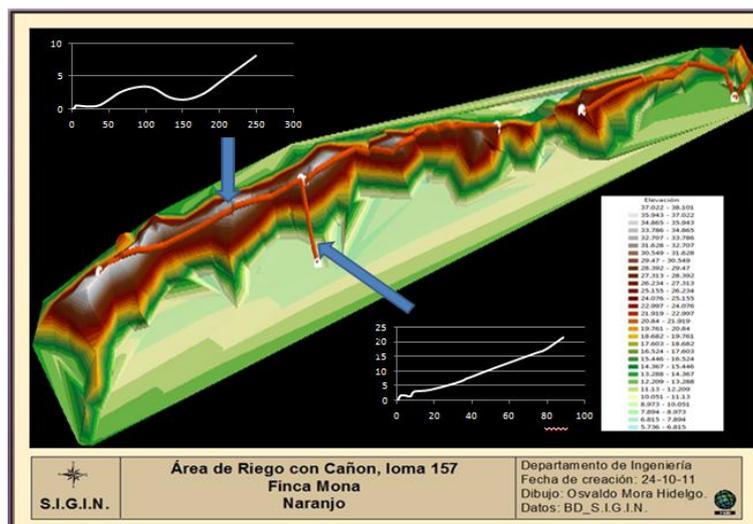
Posteriormente, se hizo un perfil de la tubería desde la fuente de agua hasta el punto más alto donde se colocaría la máquina que abastece el cañón, con el fin de realizar el diseño hidráulico, el perfil se muestra en la Figura 23:



AutoCad

Figura 4.23. Perfil de la tubería.

En la Figura 24 se observa el área que se va a regar y muestra por donde se pasará la tubería principal que se escogió para el diseño:



ArcGis

Figura 4.24: Trazo de la tubería en el terreno.

4.4 Diseño hidráulico

Mediante el perfil que se obtuvo en el campo se determinó que se necesitan de 217 m de tubería para llegar desde la fuente hasta el punto más alto donde se colocaría la máquina, la altura es de 30 m aproximadamente.

La longitud de la banda que tiene que cubrir el cañón es de 945 m, a lo largo del terreno. En una posición de la máquina, se logra cubrir una banda de 400 m, pero la máquina se va a colocar en dos posiciones, por lo tanto se estaría cubriendo 800m, si el espaciamiento entre los cañones es de 80 m y el alcance del cañón es de 60, por lo tanto se estaría regando una banda de 1000 m, que es suficiente para toda el área en 22 horas.

Conociendo el caudal que ocupa el cañón para su funcionamiento y asumiendo que la velocidad del agua en la tubería es de 2,25 m/s, esto por recomendación, para evitar sedimentación, desgaste en la tubería y evitar el golpe de ariete, por consiguiente el diámetro de la tubería principal calculada con la ecuación 42 es de:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \left(\frac{94 \text{ m}^3}{\text{h}}\right) \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{2,25 \text{ m/s} \times \pi}} \approx 0,1216 \text{ m} \approx 121,56 \text{ mm},$$

Con el diámetro teórico se busca uno igual o ligeramente menor a los que ofrecen los distribuidores, el mercado ofrece tubería de aluminio de diámetro interno d 124,55 mm y diámetro nominal de 127 mm.

Las pérdidas en la tubería principal se calculan con la ecuación 36:

$$h_f = 1,131 \times 10^9 \times \left(\frac{94}{120}\right)^{1,852} \times (124,36)^{-4,872} \times 217 \approx 9 \text{ m. c. a.}$$

Para el diseño se van hacer uso de 3 codos de 90° y 3 de 45°, una válvula de compuerta. La velocidad en la tubería es de 2,25m/s sin que haya cambio de sección, los coeficientes de pérdidas en los accesorios se tomaron del Cuadro 13, y las pérdidas secundarias se calculan con la ecuación 34. El primer cálculo se hizo para la válvula de compuerta:

$$h_s = 0,19 \left(\frac{2,25^2}{2 \times 981}\right) \approx 0,0490 \text{ m, c, a,}$$

Se hace el mismo procedimiento anterior para los codos de 90° y 45° y se estima que las pérdidas secundarias son de 0,6967 m.c.a y 0,03251 m.c.a respectivamente. Por lo tanto el total de las pérdidas secundarias son de 1,0708 m.c.a.

La diferencia entre estas presiones son las pérdidas que ocurren en la manguera de polietileno es de 36,6 m.c.a aproximadamente si el cañón está en un área plana. Estas pérdidas también se calcularon con la ecuación 32 y el resultado fue 37 m.c.a. sin embargo para nuestro caso entre la máquina y el cañón de riego hay una diferencia de altura de 8 m y la altura de la base del aspersor es de 1,50 m aproximadamente, por consiguiente la presión en la boquilla es 32,3 m.c.a. y pero se ocupan 42,2 m.c.a. Consecuentemente se tiene que aumentar la presión en la entrada de la máquina a 88,7 m.c.a, esto según la ecuación 43.

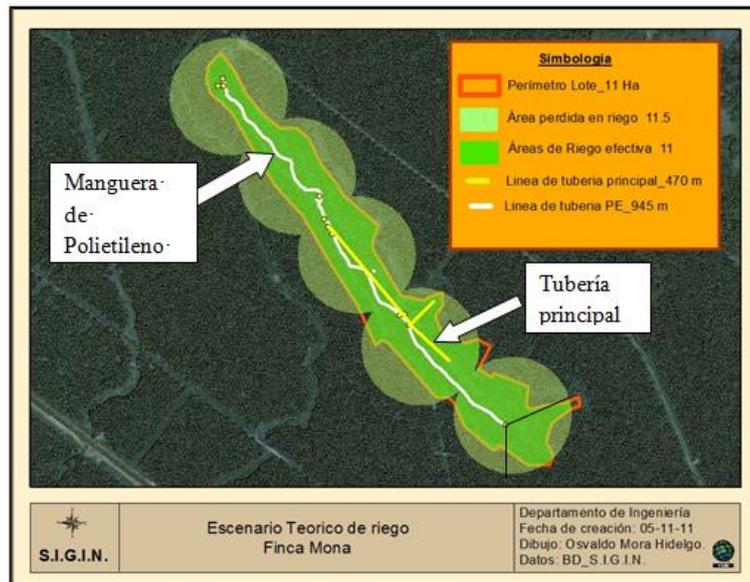
Según los cálculos hechos con la ecuación 43, en la entrada de la tubería debe ser de 128.8 m.c.a.

Con la carga dinámica total y caudal que necesita, estima que la potencia de bomba sea de 75 CV para su correcto funcionamiento, más un 10% de la potencia, entonces se ocupa de 82 CV para que trabaje todo el sistema.

Por otro lado, se necesitan 443 m de longitud de tubería para llegar hasta el punto más bajo, por lo tanto las pérdidas en la tubería son de 20,81 m.c.a, para un diámetro de 124,55 mm, las pérdidas secundarias son de 1,0708 m.c.a.

En la posición más baja a la que va estar la altura de la fuente de agua hasta la máquina es de 19 m. El cañón con respecto a la máquina hay una altura de 6 m. Por lo tanto la presión en la entrada de la máquina es de 73,2 m.c.a. Por consiguiente, en la entrada de la tubería principal se necesitan 114 m.c.a. Entonces, la potencia requerida por la bomba es de 73 CV.

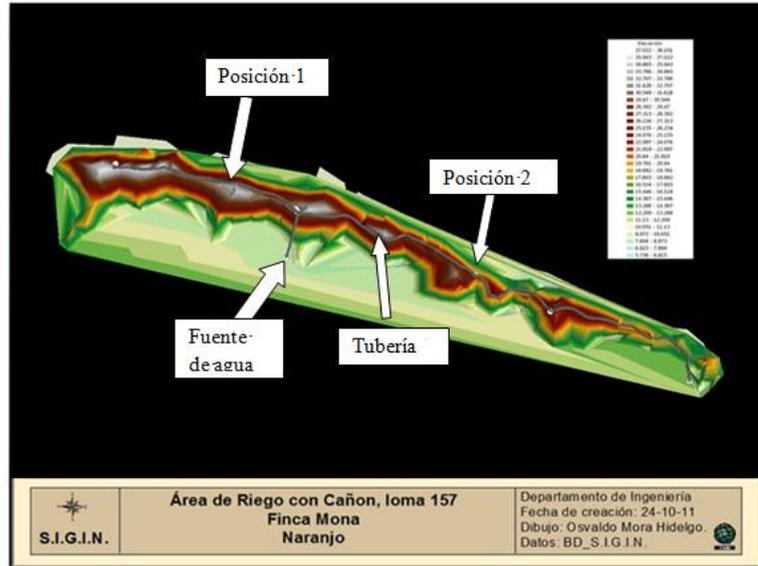
En la Figura 25, se ve el modelo teórico que muestra como sería el riego si el aspersor hace un giro completo. Para este caso se estarían regado las 11 ha efectivas del proyecto, sin embargo, se regaría otras áreas fuera del perímetro. Pero, el diseño permite regar el área en tan solo un día.



ArcGis

Figura 4.25: Escenario teórico del cañón regando a 360°.

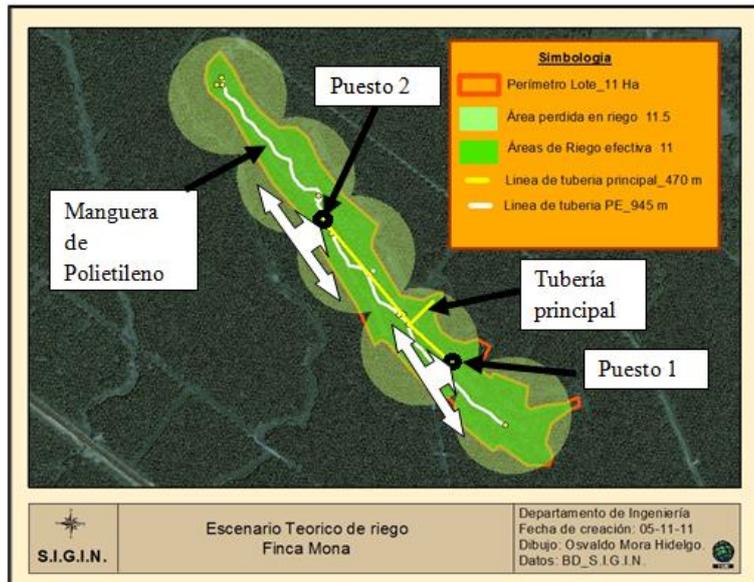
La tubería principal se ubicaría como se muestra en la Figura 4.26. Es importante tomar en cuenta las curvas que hay en el área porque éstas pueden afectar la velocidad del movimiento del cañón. Además se debe tomar en cuenta que la manguera de polietileno tiene un ángulo máximo para doblarse, y es importante colocar algunas guías que le impidan a la manguera moverse debido a la presión interna y del movimiento del carro que lleva el cañón.



ArcGis

Figura 4.26: Colocación de la tubería en el campo.

En la Figura 27, se muestra el esquema del sistema de riego seleccionado, como se debe comportar en el campo para que riegue toda el área:



ArcGis

Figura 4.27: Esquema del sistema de riego.

En la Figura 4.28, se muestra el equipo de riego seleccionado para regar el área:



Figura 28. Equipo de riego seleccionado

Fuente: www.abi-irrigation.com

Con base a la experiencia del Departamento de Ingeniería, en el Cuadro 10 se muestran los costos de los equipos, tuberías y accesorio para realizar el diseño del sistema de riego

Cuadro 4.10: Materiales para del sistema de riego.

Artículo	Descripción	Cantidad	Precio
Tubería de aluminio	Tubo de aluminio de 9 m de largo y 127mm de diámetro de acople rápido, 8,8 kg/cm ²	49	\$9 800
Codo	Codos estándar de 90° de 127 mm	5	\$ 890
Codo	Codos estándar de 45° de 127 mm	5	\$630
Manómetro	Manómetro para medir presión	1	\$502
Reductor	Reducción 94 mm X 127 mm	2	\$300
Válvulas	Válvula de compuerta	1	\$267
Unión	Unión de reparación de 127 mm	14	\$84
Motobomba	Motobomba 91 hp, carga dinámica de 167 m,c,a y 94 m ² /h	1	\$25 000
Cañón autoenrollable	Cañón viajero serie 581 GX modelo 110/720, diámetro nominal de 94 mm	1	\$32 800

El costo del proyecto total es de \$70 273 aproximadamente y la empresa tiene un presupuesto interno de \$750/ha, esto quiere decir que la inversión sería para regar 94 ha, si se logra regar 17 ha por día.

Ahora, si este presupuesto se invirtiera en un sistema de riego por subirrigación con una inversión de \$450/ ha, se podrían regar 156 hectáreas.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se implementó un sistema de riego presurizado móvil y auto enrollable, con el fin de evitar que disminuya la producción por falta de agua en la época de verano. El tiempo de riego es capaz de mantener en el suelo una lámina neta de 30 mm en 5 horas. La pluviometría del aspersor es de 4.16 mm/h para evitar perder agua por escorrentía. Además, se va a utilizar una sola máquina que se ubicará en dos posiciones dentro del campo para que riegue las 11 hectáreas en un tiempo total de operación de 22 horas, a una velocidad de avance de 40 m/h.

Al ser un sistema móvil y autopropulsado es fácil de armar, requiere de poco personal, no se necesita dejar tubería fija en el campo, evitando el robo de la misma, ya que la zona del proyecto se caracteriza por tener altos índices de vandalismo.

De acuerdo con el levantamiento topográfico se debe conducir el agua a una altura de 30 m desde la fuente de agua, usando tubería de aluminio de 127 mm, ubicada en un lugar estratégico para que conduzca el agua que necesita la máquina para poder abastecer el cañón. Para ello requiere una motobomba con una potencia mínima de 82 CV para que logre superar una carga dinámica de 128.8 m.c.a.

La inversión total del proyecto es de \$70 273, pero es capaz de regar toda el área en tan solo un día. Además, este sistema se puede adaptar a otras áreas que presentan las mismas condiciones.

Para trabajar con cañones de riego, se necesita de un personal capacitado, seguir atentamente las instrucciones del manual para evitar causarle un daño al equipo y los trabajadores. También, el camino por donde transita el cañón deben estar nivelado para evitar que se desestabilice la máquina.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Illezca, J. 2007. Principio de riego y drenaje. Editorial Universitaria del Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Pascual, B. 2008. Riego a gravedad y a presión. Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V, México.
- Mott R. 1996. Mecánica de Fluido aplicada. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Naucalpan de Juárez, México.
- Nuñez, J. 1996, Manual del Laboratorio de Edafología, Editorial Universidad Estatal A Distancia, San José, Costa Rica.
- Rolland, L. 1986. Mecanización de riego por aspersión, Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Tarjuelo J, Benito M. 2005. El Riego por Aspersión y su Tecnología. Ediciones Mundi-Prensa, 581 pp.
- Valverde, J. 2000. Riego y Drenaje. UNED, San José, Costa Rica.
- Vergara L. 2001. Manual de Diseño de sistemas de riego Tecnificado. Trabajo de titulación para optar al título de ingeniero mecánico. Universidad de Talca, Chile.
- Villalobos, M. 2008. Fundamentos de riego, 1era ed, Cartago: Costa Rica, Ediciones Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico (CDMB),
- Villalobos, M, 2009. Material del curso de riego a presión. Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Sin editar.