

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE DOCENCIA

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Profesional presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO
AUTOCOMPENSADO PARA LOS SEMILLEROS DE CAÑA DE
AZÚCAR, FINCA SANTA MARTA, COOPEAGRI R.L.**

PÉREZ ZELEDÓN, SAN JOSÉ.

ANDRÉS ADOLFO GAMBOA CONEJO

CARTAGO, 2013

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO
AUTOCOMPENSADO PARA LOS SEMILLEROS DE CAÑA DE
AZÚCAR, FINCA SANTA MARTA, COOPEAGRI R.L.

ANDRÉS ADOLFO GAMBOA CONEJO

Informe de Trabajo Profesional presentado a la Escuela de Ingeniería Agrícola como
requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

Tribunal de Evaluación

Ing. Marvin Villalobos Araya. M.Sc

Profesor Lector

Ing. Milton Solórzano Quintana. MBA

Profesor Asesor

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2013

TABLA DE CONTENIDO

I. RESUMEN.....	xi
II. INTRODUCCIÓN.....	1
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
3.1. La caña de azúcar	4
3.1.1. <i>Nombre Científico</i>	4
3.1.2. <i>Morfología de la planta de caña de azúcar</i>	4
3.1.3. <i>Climas y suelos</i>	6
3.1.4. <i>Establecimiento del cultivo</i>	7
3.1.5. <i>Semilla</i>	8
3.1.6. <i>Manejo de plantaciones</i>	8
3.1.7. <i>Plagas y enfermedades</i>	13
3.1.8. <i>Cosecha</i>	16
3.2. El suelo.....	16
3.2.1. <i>Lámina de agua en un perfil de suelo</i>	17
3.2.2. <i>Peso específico aparente (Pe)</i>	18
3.2.3. <i>Textura del suelo</i>	19
3.2.4. <i>Método para determinar la textura presente en un suelo</i>	20
3.2.5. <i>Estructura</i>	22
3.2.6. <i>Capacidad de campo (CC)</i>	23
3.2.7. <i>Punto de marchitez permanente (PMP)</i>	23
3.3. La evapotranspiración	24
3.3.1. <i>Evapotranspiración potencial (Eto)</i>	24
3.3.2. <i>Evapotranspiración real (Etr)</i>	25
3.3.3. <i>Método para determinar la evapotranspiración potencial</i>	25
3.3.4. <i>Determinación del coeficiente del cultivo k_c</i>	26
3.4. El riego	27

3.4.1.	<i>Lámina de agua contenida en un perfil del suelo</i>	27
3.4.2.	<i>Lámina neta</i>	27
3.4.3.	<i>Lámina bruta</i>	28
3.5.	Consideraciones sobre el agua para riego	29
3.6.	El riego por aspersión.....	31
3.6.1.	<i>Ventajas y desventajas del riego por aspersión</i>	31
3.6.2.	<i>Tipos de sistemas de aspersión</i>	32
3.6.3.	<i>Clasificación de los sistemas tradicionales</i>	32
3.6.4.	<i>Componentes de un sistema de riego por aspersión</i>	33
3.7.	Diseño hidráulico de un sistema de riego por aspersión	35
3.7.1.	<i>Pérdidas de carga</i>	35
3.7.2.	<i>Pérdidas secundarias de carga</i>	38
3.7.3.	<i>Regla del 20%</i>	38
3.7.4.	<i>Pérdidas admisibles según la posición del lateral</i>	38
3.7.5.	<i>Cálculo de presión a la entrada del lateral</i>	39
3.7.6.	<i>Sistemas sólidos</i>	40
3.7.7.	<i>Presión distal</i>	40
3.7.8.	<i>Diámetro de la tubería múltiple o de distribución</i>	40
3.7.9.	<i>Cálculo del diámetro de la tubería principal</i>	41
3.7.10.	<i>Velocidad permisible dentro de las tuberías</i>	41
3.8.	El riego por goteo.....	42
3.8.1.	<i>Ventajas del riego por goteo</i>	42
3.8.2.	<i>Desventajas del riego por goteo</i>	43
3.8.3.	<i>Componentes de un equipo de riego por goteo</i>	43
3.9.	Diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo	53
3.9.1.	<i>Uniformidad de riego</i>	53

3.9.2. Porcentaje de suelo humedecido (PAR)	55
3.10. Diseño agronómico en riego por goteo	56
3.10.1. Lámina neta.....	56
3.10.2. Frecuencia de riego en riego por goteo.....	57
3.10.3. Tiempo de riego.....	58
3.11. El riego por goteo en caña de azúcar	59
3.12. Carga dinámica total	61
3.12.1. Sobrepresión en válvulas	61
3.13. Programas informáticos	62
3.13.1. Surfer 10.....	62
3.13.2. AutoCAD 2010	62
3.14. Almacenamiento de agua	63
3.15. Balance hídrico.....	65
IV. METODOLOGÍA	66
4.1. Levantamiento del área.	67
4.2. Determinación de áreas y distancias.	67
4.3. Toma de muestras de suelo.	67
4.4. Determinación de la textura del suelo.....	67
4.5. Determinación de la Capacidad de campo y el Punto de marchitez permanente..	67
4.6. Determinación del peso específico aparente del suelo.....	68
4.7. Determinación de la evapotranspiración potencial de la zona de estudio.....	68
4.8. Balance hídrico.....	68
4.9. Cálculo del PAR.....	68
4.10. Diseño agronómico.	68
4.11. Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo.	69
4.12. Cálculo de la presión en los laterales de goteo y tuberías de distribución.....	69

4.13. Presión distal.	70
4.14. Cálculo del diámetro de la tubería principal.	70
4.15. Velocidad dentro de las tuberías.	70
4.16. Pérdidas secundarias del sistema.	70
4.17. Carga dinámica total.	70
4.15. Días de riego de la laguna.	70
4.18. Diseño de la caseta de bombeo.	71
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
5.1. Mapa de curvas de nivel.	73
5.2. Textura del suelo	74
5.3. Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente del suelo.	75
5.4. Peso específico aparente del suelo	75
5.5. Evapotranspiración potencial	76
5.6. Diseño agronómico	80
5.7. Diámetros para las tuberías múltiples o de distribución	84
5.8. Presión a la entrada del lateral y la múltiple.	94
5.9. Presión distal.	94
5.10. Diámetro de la tubería principal.	96
5.11. Velocidad dentro de las tuberías.	100
5.12. Días de riego de la laguna.	102
5.13. Sistema de filtrado.	103
5.14. Pérdidas secundarias	104
5.15. Carga dinámica total	105
5.16. Cuadro de operación del sistema.	109
5.17. Caseta de bombeo	110
5.18. Lista de materiales.	112

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	115
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	118
VIII.ANEXOS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tallo de la caña de azúcar	5
Figura 2. Hoja de la planta de caña de azúcar	5
Figura 3. Flor de la caña de azúcar	6
Figura 4. Remanga en caña soca.....	9
Figura 5. Subsulado en caña soca	10
Figura 6. Triángulo textural	20
Figura 7. Cuadro para el cálculo del PAR	56
Figura 8. Esquema de un sistema de riego por goteo	58
Figura 9. Laguna de la finca Santa Marta.....	64
Figura 10. Mapa de curvas a nivel de la finca Santa Marta.....	73
Figura 11. Distribución de la finca Santa Marta.....	83
Figura 12. Ubicación de la tubería principal.....	98
Figura 13. Conexión de la tubería de distribución con la tubería principal.....	99
Figura 14. Accesorios para la conexión de las cintas de goteo a las tuberías múltiples...	100
Figura 15. Pérdida de carga para el filtro de grava según el caudal	103
Figura 16. Pérdida de carga para el filtro de anillos	104
Figura 17. Características técnicas de la motobomba.....	106
Figura 18. Curva de rendimiento de la motobomba	107
Figura 19. Turnos de operación del sistema de riego	110
Figura 20. Propuesta para la Caseta de bombeo	111

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Herbicidas más usados en el control de malezas	12
Tabla 2. Diámetro de los diferentes agregados del suelo	19
Tabla 3. Clasificación de los agregados según su tamaño	23
Tabla 4. Eficiencias de los sistemas de riego.....	29
Tabla 5. Índices de salinidad.....	30
Tabla 6. Criterios de toxicidad según la FAO	31
Tabla 7. Valores del coeficientes C, según el material.....	36
Tabla 8. Coeficiente F, según la posición y el número de emisores en el lateral	36
Tabla 9. Resultados del Método de Bouyoucos.....	74
Tabla 10. Resultados por muestra.....	75
Tabla 11. Índice de calor (i) para cada mes	76
Tabla 12. Valores de Evapotranspiración potencial sin corregir	77
Tabla 13. Valores de la Evapotranspiración potencial corregidos.....	77
Tabla 14. Valores de Evapotranspiración real (Etr)	78
Tabla 15. Balance hídrico para el año 2012.....	79
Tabla 16. Diámetros de las tuberías de distribución	93
Tabla 17. Presión de entrada en los laterales y múltiples	94
Tabla 18. Presión distal en el lateral	95
Tabla 19. Diferencial de presión.....	95
Tabla 20. Pérdida de carga en el procedimiento de Carga Unitaria	96
Tabla 21. Velocidad en las tuberías múltiples	101
Tabla 22. Presión en las válvulas.....	108
Tabla 23. Presiones corregidas en las válvulas.....	108
Tabla 24. Turnos de operación del sistema.....	109
Tabla 25. Lista de materiales y precios para la Caseta de bombeo	112
Tabla 26. Lista de materiales y precios para el sistema de riego.....	112

I. RESUMEN

Este Trabajo Final de Graduación consistió en el diseño de un sistema de riego por goteo autocompensado para los semilleros de caña de azúcar de la finca Santa Marta, ubicados en la comunidad de la Ceniza, Pérez Zeledón, propiedad de la empresa CoopeAgri R.L.

Para realizar el diseño del sistema de riego, la Gerencia Agrícola de CoopeAgri estableció los siguientes parámetros: colocación de una válvula de paso en cada uno de los lotes, utilización de una bomba para agua con motor diesel e instalación superficial de las mangueras de goteo.

Se efectuó un levantamiento topográfico para obtener un mapa de curvas de nivel de dicha propiedad. Además, se tomaron muestras de suelo para el análisis respectivo de laboratorio. Basados en el resultado de los datos anteriores, se ejecutaron los cálculos necesarios para el diseño del sistema de riego. Al final, se obtuvo un diseño y una motobomba para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo.

Palabras clave: Diseño, Riego por goteo, Autocompensado, Semilleros, Bomba, Motor diesel (motor de combustión interna).

Abstract

This Final graduation work consisted in the design of a drip irrigation system, using driplines with pressure compensating emitters, for the nurseries of sugarcane in the Farm Santa Marta, located in the community of La Ceniza, Pérez Zeledón, owned by CoopeAgri R.L.

For the design of the irrigation system, the Agricultural Management of CoopeAgri established the following parameters: placement of a valve on each of the lots, use of a water pump powered with a diesel motor and surface installation of the driplines.

A topographic survey was made in order to obtain a contours map of such a property. In addition, soil samples were taken for the respective laboratory analysis. Based on the results of the previous data, the necessary calculations were executed for the design of the irrigation system. Finally, a design and a pump were obtained to meet the water requirements of the crop.

Key words: Design, Drip irrigation, Pressure compensating, nursery, Pump, Internal combustion engine.

II. INTRODUCCIÓN

La producción de semilla de caña de azúcar de excelente calidad asegura rendimientos óptimos en las cosechas y reducción en el número de plagas y enfermedades que afectan al cultivo en las plantaciones para uso comercial.

Para conseguir tal resultado, desde el inicio de la siembra se debe de suministrar la adecuada cantidad de agua y fertilizante a la planta, de tal forma que su desarrollo no se vea afectado por la época de verano y por la escasez de nutrientes en el suelo, ya que los semilleros de la finca Santa Marta son plantados en el mes de Diciembre y deben de estar listos para la siembra en el campo en el mes de Junio, ya que su destino final es la creación de nuevos semilleros semicomerciales de caña de azúcar.

Al carecer la finca Santa Marta de un sistema de riego que satisfaga las necesidades hídricas y de fertilizante del cultivo, la empresa CoopeAgri R.L ve la necesidad de colocar en este lugar, un sistema de riego por goteo autocompensado que suministre los requerimientos de agua y fertilizante que necesita la planta para su adecuado desarrollo.

Esto asegura que durante la época seca, la planta no sufra de déficit de agua y desnutrición, lo que permite la obtención de semilla de buena calidad.

Este trabajo final pretende el cumplimiento de los siguientes objetivos:

- **General:**

- ✓ Diseñar un sistema de riego por goteo autocompensado para los semilleros de caña de azúcar, empresa CoopeAgri R.L ubicados en finca Santa Marta, Pérez Zeledón.

- **Específicos:**

- ✓ Identificar, las zonas más críticas del terreno para realizar el diseño hidráulico del sistema de riego por goteo.
- ✓ Determinar la lámina de agua por aplicar al cultivo.
- ✓ Determinar la carga dinámica de la bomba a utilizar, conociendo los valores de las pérdidas primarias y secundarias del sistema.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. La caña de azúcar

La caña de azúcar pertenece a la familia de las gramíneas.

3.1.1. Nombre Científico:

Saccharum spp.

3.1.2. Morfología de la planta de caña de azúcar:

Subirós (2000), brinda una descripción de las principales partes que constituyen la planta, las cuales se detallan a continuación.

a) La raíz:

La función principal de la raíz es absorber agua y sales minerales, proporcionar anclaje y almacenar materiales de reserva.

Presenta una raíz principal y raíces adventicias, distinguiéndose dos tipos: primordiales y permanentes.

En los primeros 40 cm del perfil del suelo, se encuentra cerca del 85% de todas las raíces de la planta.

b) El tallo:

Desde el punto de vista económico es el más importante, porque es donde se almacena la sacarosa.

Los tallos están formados por nudos y entrenudos. En cada nudo está inserta una hoja, que están de forma alterna a lo largo del mismo.

El color de los tallos generalmente es verde, pero pueden encontrarse tallos con coloraciones amarillas, rojizas, moradas o combinaciones con las coloraciones anteriores.

La siguiente ilustración muestra un tallo de caña adulto con una tonalidad morada.



Figura 1. Tallo de la caña de azúcar

c) La hoja:

La función principal de la hoja es llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis, también cumple un papel en el proceso de la respiración celular, en la transpiración y en el intercambio gaseoso. La siguiente ilustración muestra la hoja de la planta de caña de azúcar.



Figura 2. Hoja de la planta de caña de azúcar

d) La Flor:

Es una inflorescencia, cuya forma, color, tamaño y ramificación dependen de la variedad.

Está formada por un eje o raquis principal que se divide en ejes secundarios y terciarios, tal como lo muestra la siguiente figura.



Figura 3. Flor de la caña de azúcar

La formación de la flor presenta aspectos positivos y negativos. Como aspecto positivo lo constituye en que es una fuente para el mejoramiento genético de la planta. La principal desventaja lo constituye en una disminución del rendimiento por pérdidas de sacarosa en la planta.

3.1.3. Climas y suelos:

La caña de azúcar requiere altas temperaturas durante el período de crecimiento y bajas temperaturas durante el período de maduración. Entre mayor sea la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo de maduración, mayor será la posibilidad de obtener jugos de alta pureza y un mayor rendimiento de azúcar en la plantación (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (1991), la temperatura ideal para la germinación de la caña de azúcar es de entre 32 y 38°C, para el macollamiento de 32°C y para el crecimiento de 27°C.

Para el Ministerio de Agricultura y Ganadería (1991), la precipitación anual idónea para este cultivo es de 1500 mm bien distribuida durante la fase de crecimiento. Se necesita la mayor disponibilidad de agua en la etapa de crecimiento y desarrollo, durante el período de maduración esta cantidad debe reducirse, para limitar el crecimiento y lograr la acumulación de sacarosa.

La caña de azúcar crece favorablemente en una gran variedad de suelos siendo los más adecuados los de textura franca o franco arcillosos, bien drenados, profundos, ricos en

materia orgánica, topografía plana o semiplana y con pH entre 5,5 y 7,5 (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

3.1.4. Establecimiento del cultivo:

Según Murillo, Valverde & Navarro (2010), para el establecimiento de una plantación de caña de azúcar se recomienda el siguiente programa:

Mecanización del suelo:

La labor de mayor importancia en el establecimiento del cultivo de caña de azúcar, cuyo objetivo fundamental es descompactar el suelo y eliminar malezas anuales y perennes.

En un suelo con la adecuada preparación, el sistema radicular de la planta tiene las condiciones ideales para desarrollarse y explorar el suelo, generando la máxima capacidad para absorber los nutrientes y un adecuado crecimiento que se manifestará en una mayor producción.

Se recomienda realizar las labores de mecanización en la época seca, con un mes de antelación a la siembra. La mecanización incluye las siguientes labores:

a) Primera rastrea:

Utilizada principalmente para destruir cepas viejas en el caso de las renovaciones, además de uniformar el terreno y controlar malezas perennes.

b) Arado:

Se recomienda el uso del arado de cinceles, ya que cumple con el objetivo de descompactar el suelo. El arado debe de profundizarse entre 40 a 50 cm para garantizar las condiciones adecuadas para el cultivo.

c) Segunda rastrea:

Utilizada para afinar el terreno al destruir agregados de gran tamaño facilitando la siembra y favoreciendo la germinación de la caña. Cumple también con la labor de control de malezas.

d) Surcado:

Se realiza tratando de formar curvas de nivel con una pendiente no mayor al 2% para disminuir la escorrentía.

La profundidad de los surcos debe de ser entre 30 a 40 cm.

3.1.5. Semilla:

La semilla de caña la constituye un trozo de tallo con tres yemas como máximo (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

Se debe de utilizar semilla de buena calidad que presente las siguientes características (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010):

- ✓ Pureza genética y buen vigor.
- ✓ Libre de plagas y enfermedades, preferiblemente con trazabilidad en cultivo de tejidos “in vitro” o tratamiento hidrotérmico.
- ✓ Edad entre 8 y 10 meses.
- ✓ Erecta de buen tamaño y grosor.
- ✓ De buen manejo agronómico.

El tiempo máximo de siembra recomendado es cinco días después del corte, ya que puede disminuir la germinación (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

En la región de Pérez Zeledón y Buenos Aires se recomienda sembrar de 1,30 a 1,50 m entre surcos y a tres cañas por chorro, requiriendo una cantidad de 12 a 13 ton/ha (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

3.1.6. Manejo de plantaciones:

Para Murillo, Valverde & Navarro (2010), describen las siguientes prácticas para el manejo de plantaciones cañeras.

a) Remanga:

Consiste en recoger los residuos de la cosecha para acomodarlos a lo largo de los entresurcos, como lo muestra la siguiente figura, esta práctica contribuye al control de malezas y además incorpora material orgánico al suelo.



Figura 4. Remanga en caña soca

b) Aporca:

Brinda una mayor superficie de anclaje al sistema radicular del cultivo, sirve como medio de incorporación del fertilizante evitando su pérdida por escorrentía y acelera el proceso de absorción por la planta.

c) Subsulado:

Debe de realizarse luego de la tercera cosecha primordialmente en suelos compactados, se realiza con el fin de podar las raíces viejas, estimular el crecimiento de nuevas raíces y dar oxigenación, suavizar y descompactar el terreno, como lo muestra la figura 5. Se utiliza el arado de cinceles a una profundidad de entre 30 a 40 cm.

Se debe de ejecutar cuando el suelo se encuentra levemente húmedo y el rebrote está pequeño. Dicha labor mejora la infiltración del agua de lluvia, reduciendo la erosión. Propicia un aumento de productividad y mayor vida útil al cultivo.



Figura 5. Subsolado en caña soca

d) Encalado:

Se recomienda en suelos limitantes de fertilidad y con altos contenidos de acidez (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

e) Control de malezas:

Se ha encontrado que el período crítico de competencia de la caña planta con las malezas, ocurre entre los 20 y 100 después de la siembra. Para la caña soca entre los 25 y 90 días después del corte. La caña de azúcar que ha tenido su primer corte se le denomina caña soca (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

Las malezas interfieren con el cultivo por agua, luz y nutrientes, dependiendo la cantidad y su estado de desarrollo causan un significativo daño económico al reducir los rendimientos de campo.

En la región de Pérez Zeledón y Buenos Aires las malezas predominantes en las plantaciones cañeras son *Rottboelli sp* (Arrocillo, Zacate Fuego) y *Digitaria sp* (Digitaria) (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

El combate de las malezas en el cultivo de la caña debe ser integrado, ya que no existe un método de combate único que proporcione un combate efectivo. Para realizar un manejo integrado se deben considerar los métodos culturales, mecánicos y químicos (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

Para un buen manejo cultural de las malezas se logra usando semilla tratada y de buena calidad, con una adecuada preparación del terreno, proporcionando la humedad necesaria mediante riego para un rápido desarrollo del cultivo, plantando en la densidad óptima de siembra de acuerdo con la variedad y la región, realizando un buen combate de insectos y enfermedades y suministrando un nivel adecuado de fertilización (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

Para Murillo, Valverde, & Navarro (2010), el control mecánico se emplea durante los primeros meses del cultivo y antes del control químico, implica labores como la aporca utilizando implementos conformados por discos y cinceles.

El control químico hace referencia al uso de herbicidas, ya sea pre-emergentes, post-emergentes o una mezcla de ambos, el siguiente cuadro muestra una descripción de las mezclas más comunes para la zona de Pérez Zeledón y Buenos Aires (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

Tabla 1. Herbicidas más usados en el control de malezas

<i>Mezcla</i>	<i>Dosis (l o kg)</i>	<i>Época de aplicación</i>	<i>Malezas que controla</i>
Diurón + Triclopyr	2 0,5	Post temprana	Hojas anchas, Rottbollia con ausencia de Digitaria
Terbutrina + Terbutilazina + Triclopyr	3 2 0,5	Post temprana	Hojas anchas, Rottbollia con ausencia de Digitaria
Hexazinona + Triclopyr	0,5 0,5	Post temprana	Hojas anchas, Rottbollia y Digitaria
Diurón+Hexazinona + Triclopyr	2 0,5	Post temprana	Hojas anchas, Rottbollia y Digitaria
Ametrina + Atrazina + Triclopyr	4 4 0,5	Post temprana	Hojas anchas, Rottbollia con ausencia de Digitaria
Diurón + Triclopyr + Pendimetalina	2 0,5 2-3	Post temprana	Problemas serios en bancos de semilla, Rottbollia

Fuente: Murillo, Valverde & Navarro, 2010.

f) Fertilización:

Es una práctica agrícola utilizada para proporcionarle a la planta los requerimientos nutricionales óptimos que garanticen productividad en el cultivo. La caña de azúcar requiere gran cantidad de nutrientes que deben ser restablecidos por medio de fertilizantes químicos y orgánicos (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

Los suelos cañeros de Pérez Zeledón y Buenos Aires presentan bajos contenidos nutricionales de potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

3.1.7. Plagas y enfermedades:

Las plagas con mayor impacto en Pérez Zeledón y Buenos Aires son:

- **Barrenador común del tallo (*Diatraea spp.*):**

Las larvas barrenan los tallos de cualquier edad pero cuando la caña es joven causan la muerte de la yema terminal. En los tallos desarrollados, el daño se localiza en los entrenudos, los hace quebradizos y promueve el desarrollo de yemas laterales por pérdida de la parte terminal del tallo. El deterioro en el peso y contenido de azúcar almacenado en el tallo causa grandes pérdidas económicas. Las lesiones hechas por el barrenador son puerta de entrada a patógenos fungosos y bacterianos (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

Se han identificado enemigos naturales como ciertas avispas nativas de la familia *Trichogrammatidae* que parasitan los huevecillos, otra que parasitan las larvas como *Iphyaulax sp* y al parásito nativo de mayor importancia en el país, la mosca *Paratheresia claripalpis* (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

- **Cigarrita antillana (*Saccharosydne saccharivora*):**

Las ninfas y los adultos atacan las plantaciones nuevas. Succionan los jugos y producen debilidad de la planta y amarillamiento del follaje. Debido a las sustancias azucaradas que segregan estos insectos, se propicia el crecimiento de una mancha negra en las hojas y la planta pierde capacidad para fotosintetizar (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

La plaga tiene enemigos naturales que generalmente mantienen bajas las poblaciones (*Mesogramma sp.*, *Zelus sp.*, *Mantispa sp.*, *Coleomegilla maculata*, *Cycloneda sanguinea* y *Chrysopa sp.*).

- **Falso medidor (*Mocis latipes*):**

Las larvas se alimentan de las hojas de la maleza u otras gramíneas dentro del cañal. Cuando se agota el alimento, estos pasan al cultivo, ocurriendo en algunos casos la defoliación completa de la planta.

Según de la variedad que se trate, del estado nutricional y de algunas prácticas de cultivo inadecuadas, la plaga puede ocasionar daños económicos en plantaciones menores de 4 meses (Subirós, 2000).

- **Taladrador menor (*Elasmopalpus lignosellus*):**

La larva perfora el tallo recién formado y penetra hasta el corazón produciendo la muerte del retoño. Las larvas tienen hábitos migratorios y una sola puede perforar varios tallos (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

- **Joboto (*Phyllophaga spp*):**

Las larvas destruyen las raíces de las plantas, lo que produce amarillamiento y muerte lenta del follaje.

En siembras nuevas se puede prevenir el ataque mediante una buena preparación del terreno, ya que el paso de la maquinaria destroza gran parte de las larvas y pupas o las deja expuestas para que se las coman las aves (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

- **Salivazo (*Prosapia spp*):**

Las ninfas se alimentan de las raíces adventicias que se encuentran en la base del tallo, sin provocar un daño serio. Por el contrario, los adultos, succionan savia e inyectan sustancias tóxicas. Cuando el ataque de la plaga es severo, se reduce significativamente el crecimiento de las plantas (Subirós, 2000).

Las enfermedades de mayor importancia para la zona de Pérez Zeledón y Buenos Aires se encuentran:

- **Pokkah Boeng (*Fusarium moniliforme*):**

Las cañas afectadas muestran cogollos retorcidos, clorosis en la base del tallo y deformación del tallo. Esta enfermedad no es de importancia económica (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

- **Roya naranja (*Puccinia kuehnii*):**

Los síntomas se caracterizan por la formación inicial de pequeñas manchas necróticas, las lesiones avanzadas son de color naranja. En casos severos producen la muerte de la hoja, ocasionando disminución en el grosor y longitud de los tallos (Murillo, Valverde, & Navarro, 2010).

- **Roya roja (*Xanthomonas rubrilineans*):**

Los síntomas son rayas de color rojo oscuro, paralelas a la nervadura central de las hojas y con bordes bien definidos que en ciertas ocasiones se unen para formar bandas. En casos severos, causa la pudrición del cogollo y posteriormente del tallo. Bajo condiciones favorables a la enfermedad esto puede cobrar características de importancia económica (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

- **Raquitismo de las socas (*Leifsonia xylii*):**

Produce una decoloración de los tejidos internos en las zonas de los nudos. Los tallos son relativamente pequeños y faltos de vigor. Su incidencia es de importancia en el país (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

- **Roya café (*Puccinia melanocephala*):**

La incidencia de la enfermedad es muy significativa. Se manifiesta como manchas cloróticas pequeñas y alargadas de color amarillento que al aumentar de tamaño toman un color marrón y se rodean de un halo amarillo pálido. Las lesiones forman granillos especialmente en el envés de las hojas (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

- **Mosaico de la caña:**

Produce moteado en las hojas jóvenes a manera de pequeñas manchas de color verde amarillento o blancuzco, sobre todo en un fondo verde oscuro.

La medida de combate que se debe practicar es la siembra de variedades tolerantes (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

3.1.8. Cosecha:

Con la debida antelación al corte, se deben arreglar los caminos principales, secundarios y terciarios, de tal manera que los vehículos que transportan la caña, no tengan problemas en el trayecto al ingenio. También con la anticipación conveniente debe asegurarse de que estén contratados los suficientes cortadores para la zafra (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

En la fase de corte y limpia de la caña, el productor debe poner particular interés en vigilar que la caña se corte al ras del suelo, porque es en la base de los tallos donde se encuentra la mayor cantidad de sacarosa. En el caso de la caña que se cosecha sin quemar, los tallos se deben despajar completamente y despuntarse correctamente (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

La caña se debe cargar sin basura y sin tierra. Es necesario vigilar que no quede caña tirada en el campo, además que se estibe y amarre bien sobre los vehículos de transporte para que no se caiga por el camino. La caña no debe quedar cortada en el campo un máximo 36 horas, ya que si pasa de ese lapso, se reduce el contenido real de azúcar (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

El transporte de la caña puede ser en forma directa, del campo al ingenio, o indirecta, del campo a romanas establecidas para tal fin; donde el transporte se puede efectuar por medio de cabezales, camiones grandes o pequeños (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

3.2. El suelo

Según Moya (2009), por suelo se entiende a una mezcla compleja formada de:

- ✓ Piedras y minerales característicos.
- ✓ Raíces y restos vegetales.
- ✓ Microorganismos vivos y muertos.
- ✓ Poros.

A su vez, los poros se dividen en:

- 1) Macroporos: circulación de agua y aire.
- 2) Microporos: almacenamiento de agua.

Siendo esto el resultado de la disgregación de la roca, por la acción de los agentes físicos, químicos y biológico.

Según Moya (2009), para su estudio se divide en los siguientes horizontes:

- **Horizonte A:**

Está formado por la mayoría de las raíces y microorganismos. Es el más erosionado.

- **Horizonte B:**

Se encuentra menos disgregado que el anterior. También se le llama de Acumulación porque las aguas arrastran la arcilla y fertilizantes del horizonte A

- **Horizonte C:**

Formado por la roca madre que dio origen al suelo.

3.2.1. Lámina de agua en un perfil de suelo:

Según Villalobos (2008), para conocer la lámina de agua que contiene un perfil de suelo, se debe determinar el porcentaje de humedad gravimétrica y volumétrica que presenta dicho suelo. La humedad gravimétrica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$Hg = \left(\frac{Psh - Pss}{Pss} \right) \cdot 100 \dots \dots (1)$$

Donde:

- ✓ Hg: humedad gravimétrica (%).
- ✓ Psh: Peso húmedo del suelo (g)
- ✓ Pss: Peso seco del suelo (g)

La humedad volumétrica se obtiene multiplicando la humedad gravimétrica por el peso específico aparente relativo, como se visualiza en la siguiente ecuación:

$$Hv = Hg \cdot \left(\frac{Pe}{Pe_{H_2O}} \right) \dots \dots (2)$$

Donde:

- ✓ Hv: humedad volumétrica (%)
- ✓ Hg: humedad gravimétrica (%)
- ✓ Pe: peso específico aparente (g/cm^3)
- ✓ P_{H_2O} : Peso específico del agua (g/cm^3)

Como el peso específico del agua es de un gramo por centímetro cúbico, se omite generalmente de la ecuación anterior (Villalobos, 2008).

El suelo retiene el agua en función de las características físicas y de la profundidad del mismo. Dentro de las propiedades físicas más importantes del suelo destacan:

3.2.2. *Peso específico aparente (Pe):*

Es la relación que existe entre el peso del suelo seco y el volumen aparente del suelo (Villalobos, 2008).

Se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$Pe = \frac{Pss}{V} \dots \dots (3)$$

Donde:

- ✓ Pe: peso específico aparente (g/cm^3)
- ✓ Pss: Peso del suelo seco (g)
- ✓ V: Volumen del cilindro que contiene al suelo (cm^3)

3.2.3. Textura del suelo:

Se refiere al porcentaje con base al peso de los diferentes agregados que conforman al suelo, según el diámetro de sus partículas se clasifica en arena gruesa, arena fina, limo y arcillas. La tabla siguiente muestra el diámetro de las diferentes partículas.

Tabla 2. Diámetro de los diferentes agregados del suelo

Fración del suelo	Diámetro de las partículas (mm)
Arena gruesas	2,0 – 0,2
Arena finas	0,2 – 0,02
Limo	0,02 – 0,002
Arcilla	Menores de 0,002

Fuente: Villalobos, 2008.

Para terminar la textura presente en un suelo, se utiliza el triángulo textural, ya que según sea la proporción de los diferentes agregados presentes en el suelo, así será la textura del mismo.

A continuación, se muestra una figura del triángulo textural:

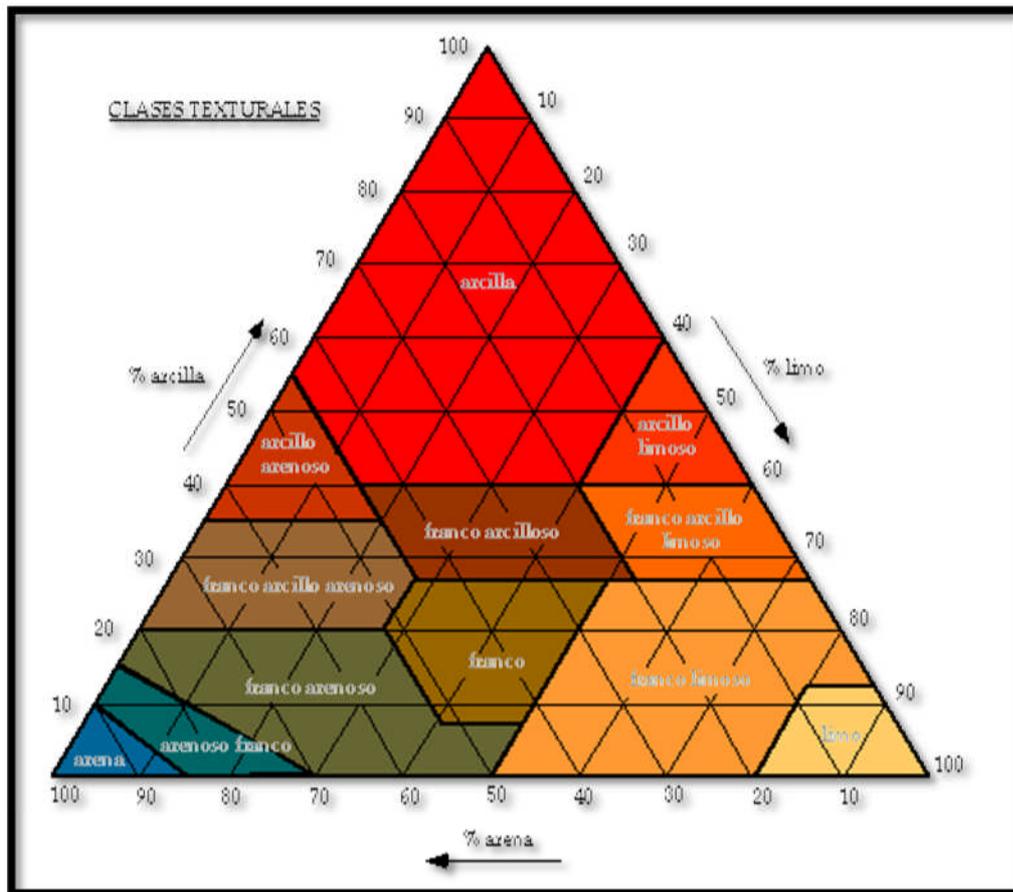


Figura 6. Triángulo textural

3.2.4. Método para determinar la textura presente en un suelo:

Se utiliza el método de Bouyoucos.

Chavarría (2012), describe el método de Bouyoucos de la siguiente manera:

1. Si existe materia orgánica en el suelo se destruye antes con peróxido de hidrógeno al 30% y calentando de 20 a 30 minutos.
2. Se debe de agregar agua que cubra el suelo 1 cm una vez hecho esto se agrega 5 ml de H_2O_2 .
3. Se repite la dosis de peróxido de hidrógeno hasta que cese la efervescencia, se filtra el suelo y se lava con agua destilada 3 veces. Se seca el suelo por 24 horas. Esto se hace con suelos que tienen más de 5% de materia orgánica, generalmente la materia orgánica está incluida en el análisis del hidrómetro si es menor de 5%.

4. Se pesa una muestra de suelo de 40 g secada con anterioridad en la estufa por 24 horas en un horno a 110 °C y libre de materia orgánica. Luego se maceriza y se tamiza en un tamiz de 2 mm. Se coloca en un dispensador. Se agrega 15 ml de hexametáfosfato de sodio (30% M/V) y 250 cc de agua.
5. Se coloca la muestra en el agitador mecánico y se agita por 15 minutos.
6. Se transfiere a un cilindro de Bouyoucos, se llena con agua destilada hasta la marca de un litro, con el hidrómetro dentro.
7. Se saca el hidrómetro, se tapa el cilindro y se agita la suspensión fuertemente.
8. Se coloca el cilindro en la mesa de trabajo y se toma el tiempo. A los 20 segundos se inserta el hidrómetro cuidadosamente de tal manera que quede estable y no pueda subir y bajar dentro del cilindro; se lee el hidrómetro a los 40 segundos. Se anota la lectura. Se Toma la temperatura inmediatamente después de leer el hidrómetro. Si se forman espumas se agrega 3 ó 4 gotas de alcohol amílico para facilitar la lectura.
9. Por cada grado arriba de 19,40 °C, se agrega 0,30 a la lectura del hidrómetro para la corrección respectiva. Por cada grado bajo 19,40 °C, se resta 0,30.
10. Se calcula 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 incluido. La arena se deposita en el fondo del cilindro, a los 40 segundos por lo tanto la lectura del hidrómetro a los 40 segundos corregida por la temperatura respectiva, da la cantidad de limo y arcilla en suspensión, por ello se calcula el porcentaje de arena que se encuentra sedimentada, por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Material en suspensión} = \frac{\text{Lectura del hidrómetro a los 40 s} \cdot 100}{\text{Peso de la muestra}} \dots \dots (4)$$

$$\text{Porcentaje de arenas} = 100 - \% \text{ de material en suspensión} \dots \dots (5)$$

11. Se toma la lectura a las dos horas, se introduce el hidrómetro antes de hacer la lectura a ese tiempo.
12. Se calcula el porcentaje de arcilla en la muestra. Se supone que al final de dos horas la arcilla y la arena se han sedimentado. La lectura corregida por la temperatura del hidrómetro al final de las dos horas representa los gramos de arcilla de la muestra. El porcentaje de arcilla coloidal se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de arcillas} = \frac{\text{Lectura del hidrómetro a las 2 h} \cdot 100}{\text{Peso de la muestra}} \dots \dots (6)$$

13. Se calcula el porcentaje de limo de la muestra por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de limo} = 100 - (\% \text{ arenas} + \% \text{ arcillas}) \dots \dots (7)$$

14. Se determina la textura del suelo por medio del triángulo textural.

3.2.5. Estructura:

Indica la ordenación o disposición de las partículas, teniendo en cuenta la ordenación o interacción de todos los componentes del suelo (Moya, 2009).

Según Moya (2009), clasifican según su forma en:

a) Sin estructura:

- ✓ Granular simple: la normal en suelos arenosos, donde los granos no están unidos.
- ✓ Maciza: cuando existe cierta unión de los granos, con pequeñas cantidades de arcilla y aportaciones de materia orgánica.

b) Con estructura:

- ✓ Granular: agregados redondeados y similares de tamaño; ricos en materia orgánica, siendo la mejor para los suelos agrícolas.
- ✓ Laminar: es la peor, ya que tanto el aire como el agua tienen muchas dificultades para circular.
- ✓ Poliédrica: tiene formas variables.
- ✓ Prismática: propia de suelos arcillosos. Los agregados son alargados verticalmente.
- ✓ Columnar: la prismática con cantos redondeados por el sodio

Moya (2009), brinda la siguiente clasificación en función del tamaño de los agregados, tal como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 3. Clasificación de los agregados según su tamaño

Estructura	Tamaño de los agregados (mm)
Muy fina	Inferiores a 5
Fina	De 5 a 10
Media	De 10 a 20
Gruesa	De 20 a 50
Muy gruesa	Superiores a 50

Fuente: Moya, 2009

3.2.6. Capacidad de campo (CC):

Se define como el volumen de agua que es capaz de retener el suelo. Generalmente se expresa en milímetros (mm) (Moya, 2009).

Para Villalobos (2008), la tensión a la cual el suelo retiene el agua en capacidad de campo depende del tipo textura. Para suelos francos la tensión aproximada es de 0,3 atmósferas, para suelos arenosos es de 0,1 atmósferas y para los suelos arcillosos es de 0,5 atmósferas.

Para estimar el valor de la Capacidad de Campo, se emplea la siguiente ecuación:

$$CC = 0,6382 \cdot \%Arcilla + 0,2845 \cdot \%Limo + 0,0507 \cdot \%Arena \dots \dots (8)$$

3.2.7. Punto de marchitez permanente (PMP):

Según Villalobos (2008), se refiere al contenido de humedad que presenta el suelo, a partir del cual las plantas se comienzan a marchitar y no recuperan su turgencia, aunque se coloquen en un estado de humedad previa al marchitamiento.

Para estimar el Punto de marchitez, se utiliza la siguiente ecuación:

$$PMP = 0,4897 \cdot CC + 1,1666 \dots \dots (9)$$

El agua está retenida en el suelo a una tensión que oscila entre 13 y 15 atmósferas (Villalobos, 2008).

Tanto las ecuaciones 8 y 9 deben de usarse con cierta reserva, ya que en la capacidad de retención de agua en el suelo intervienen otros factores como lo son los agregados del suelo, el contenido de materia orgánica, entre otros (Villalobos, 2008).

3.3. La evapotranspiración

La evapotranspiración (Etc) es la combinación de la evaporación desde la superficie de suelo y la transpiración de la vegetación (Chávarri, 2004).

Según Chávarri (2004), dentro de los factores que influyen en la evapotranspiración se encuentran:

- **Ambientales:**

El aspecto físico del proceso de transpiración, está influenciado por los mismos factores ambientales que rigen a la evaporación, sin embargo los factores meteorológicos como la iluminación, la temperatura y la humedad de la atmósfera, tienen un doble efecto en la transpiración debido a su influencia en la abertura de los estomas.

- **Fisiológicos:**

La transpiración es afectada por las características de la especie vegetal, edad, desarrollo, tipo de follaje y profundidad radicular. Una de las características de la especie vegetal, influenciada por las condiciones ambientales, es el número de estomas por unidad de área foliar.

Otra particularidad de la especie vegetal, está relacionada con el tipo y desarrollo del sistema radicular.

3.3.1. Evapotranspiración potencial (Eto):

Fue definida por Doorembos y Pruitt en el año de 1976 como: “la tasa de evaporación en mm/día de una extensa superficie de pasto (grama) verde de 8 a 15 cm de altura, en crecimiento activo, que sombrea completamente la superficie del suelo y que no sufre de escasez de agua” (Chávarri, 2004).

3.3.2. *Evapotranspiración real (Etr):*

Para Villalobos (2008), el desarrollo de los cultivos es bajo condiciones de humedad que no son óptimas, por lo que se habla de evapotranspiración real, que depende del agua disponible en el suelo y de las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla el cultivo.

Según Chávarri (2004), la Etr nunca será mayor que Etc, ya que al aumentar la tensión del agua en el suelo, disminuye la capacidad de las plantas para obtener el volumen de agua exigido por las condiciones del ambiente. Bajo estas condiciones disminuye la transpiración del cultivo, por lo tanto, Etr es inferior a Etc y también inferior a Eto.

La evapotranspiración real de un cultivo, en un determinado momento del ciclo vegetativo, se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$Etr = Eto \cdot kc \dots \dots (10)$$

Donde:

- ✓ Etr: evapotranspiración real (mm/día o mm/mes).
- ✓ Eto: evapotranspiración potencial (mm/día o mm/mes).
- ✓ kc: coeficiente del cultivo.

3.3.3. *Método para determinar la evapotranspiración potencial:*

El método de Thornthwaite reportada valores aceptables para zonas húmedas, bajos en regiones secas y altos para zonas desérticas (Chávarri, 2004).

El proceso de cálculo se detalla a continuación:

1. Se calcula el “Índice de calor mensual (i)”, a partir de la temperatura media mensual (°C), por medio de la siguiente ecuación:

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \dots \dots (11)$$

2. Posteriormente, se calcula el “Índice de calor anual (I)”, sumando los 12 valores de i.

$$I = \sum i \dots \dots (12)$$

3. Se calcula la Eto mensual sin corregir mediante el uso de la siguiente ecuación.

$$ETO_{s.c} = 16 \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^a \dots \dots (13)$$

Donde el valor de “a” se obtiene por medio de la siguiente ecuación.

$$a = 675 \times 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \times 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \times 10^{-5} \cdot I + 0,49239 \dots \dots (14)$$

4. Se realiza una corrección para el número de días del mes (d) y número de horas de sol (N), según la siguiente ecuación.

$$ETO = ETO_{s.c} \left(\frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30} \right) \dots \dots (15)$$

Donde:

- ✓ ETO: evapotranspiración potencial (mm/mes).
- ✓ ETO_{s.c}: evapotranspiración potencial sin corregir (mm/mes).
- ✓ N: número de horas sol.
- ✓ d: días del mes seleccionado.

3.3.4. Determinación del coeficiente del cultivo kc:

Según Villalobos (2008), el kc expresa la relación entre evapotranspiración real y la potencial, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$kc = \frac{Etr}{Eto} \dots \dots (16)$$

Donde:

- ✓ kc: coeficiente del cultivo.
- ✓ Etr: evapotranspiración real (mm/día o mm/mes).
- ✓ Eto: evapotranspiración potencial (mm/día o mm/mes).

El coeficiente de cultivo (kc), depende de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de la especie y expresa la variación de su capacidad para

extraer agua del suelo durante el ciclo vegetativo. La especie vegetal y el tamaño de la planta representada por su volumen foliar y radical, rige también el coeficiente kc (Chávarri, 2004).

3.4. El riego

El riego consiste en la aplicación eficaz y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer la cantidad consumida por evapotranspiración de los cultivos entre dos riegos consecutivos (Villalobos, 2008).

3.4.1. Lámina de agua contenida en un perfil del suelo:

Según Villalobos (2008), para calcular la máxima lámina de agua que un suelo puede retener, se hace con base a la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y la profundidad del perfil, utilizando la siguiente ecuación.

$$Lm = \frac{CC - PMP}{100} \cdot \frac{Pe}{Pe_{H2O}} \cdot Prof \dots \dots (17)$$

Donde:

- ✓ Lm: lámina máxima que retiene el suelo (cm, mm, etc.).
- ✓ CC: capacidad de campo (%).
- ✓ PMP: punto de marchitez permanente (%).
- ✓ Pe: peso específico aparente del suelo (g/cm³).
- ✓ Pe_{H2O}: peso específico del agua (g/cm³).
- ✓ Prof: profundidad del perfil a considerar (cm, mm, etc.).

Como el peso específico del agua es igual a 1 g/cm³, se omite de la ecuación anterior (Villalobos, 2008).

3.4.2. Lámina neta:

Para Villalobos (2008), la profundidad del perfil a regar está definida por la profundidad radicular del cultivo y del agotamiento permitido, ya que no es conveniente dejar que el suelo se seque hasta el Punto de marchitez permanente.

La lámina neta se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$Ln = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Pe \cdot Prof \cdot Ag \dots (18)$$

Donde:

- ✓ Ln: lámina neta a aplicar (cm, mm, etc.).
- ✓ CC: capacidad de campo (%).
- ✓ PMP: punto de marchitez permanente (%).
- ✓ Pe: peso específico aparente del suelo (g/cm^3).
- ✓ Prof: profundidad radicular del cultivo (cm, mm, etc.).
- ✓ Ag: agotamiento permitido (decimal).

3.4.3. Lámina bruta:

En un sistema de riego se van a dar pérdidas de agua de forma inevitable, por evaporación, percolación profunda o escorrentía, por lo que si se aplica al suelo una lámina neta, en el suelo quedaría una lámina inferior. Para evitar lo anterior, se debe de aplicar una lámina mayor de agua, de tal manera que en el perfil de suelo quede la lámina neta (Villalobos, 2008).

La lámina bruta se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$Lb = \frac{Ln}{Ef_{apl}} \dots (19)$$

Donde:

- ✓ Lb: lámina bruta (cm, mm, etc.).
- ✓ Ln: lámina neta (cm, mm, etc.).
- ✓ Ef_{apl} : eficiencia de aplicación (decimal).

La eficiencia de aplicación de agua determina directamente la superficie factible a regar sin causar déficit hídrico al cultivo (Antúnez, Mora, & Felmer, 2010).

En términos generales, se considera eficiente un método de riego cuando el agua aplicada al cultivo es utilizada en un porcentaje superior al 70% (Antúnez, Mora, & Felmer, 2010).

En cuanto a los sistemas de riego por goteo, las eficiencias teóricas alcanzan el orden del 90% al 95%, en la práctica un mal manejo puede ocasionar una merma relevante en el desempeño del sistema, con pérdidas de agua de diversa naturaleza (Antúnez, Mora, & Felmer, 2010).

La Tabla 4 muestra los valores de eficiencia de los diferentes sistemas de riego brindados por Antúnez, Mora, & Felmer (2010).

Tabla 4. Eficiencias de los sistemas de riego

Método de riego	Eficiencia de aplicación (%)
Surcos	45
Aspersión	75
Microaspersión	85
Goteo	90

Fuente: Antúnez, Mora, & Felmer, 2010

3.5. Consideraciones sobre el agua para riego

En el agua de riego, se tiene que procurar el mantener una calidad apta para el riego, especialmente en goteo, donde las posibilidades de lixiviación de sales son muy escasas (Moya, 2009).

Para Moya (2009), la calidad del agua para riego viene dada por el factor de la calidad.

La calidad abarca una serie de aspectos, tales como:

- **Características físicas:**

Se refiere a las materias o sustancias que llevan en suspensión y pueden provocar problemas en los sistemas de riego, entre las que se encuentran:

- 1) Tierra: arena, limo, arcilla
- 2) Materia orgánica: restos de plantas y animales, insectos, algas, bacterias, etc.
- 3) Aguas residuales: detergentes, grasas, aceites minerales y otras impurezas.

- **Características químicas:**

Se procura incluir el máximo de elementos químicos, que van afectar más al suelo o la planta, dentro de las características más importantes a tomar en cuenta se encuentran:

- 1) El pH.
- 2) Contenido total de sales.
- 3) Contenido de sodio (Na) con relación al calcio (Ca) y al magnesio (Mg).
- 4) Contenido de iones tóxicos, como cloro (Cl), Sodio (Na) y boro (Bo).
- 5) El contenido de metales pesados.

Para Pizarro (1990), la calidad del agua para riego viene dada por tres factores: salinidad, sodicidad y toxicidad.

- **Salinidad:**

Un alto contenido de sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber agua del suelo.

En el año de 1972, el Comité de consultores de la Universidad de California, presenta la siguiente clasificación con respecto a la salinidad.

Tabla 5. Índices de salinidad

Índice de salinidad	Concentración (mmhos/cm)	Riesgo de salinidad
1	< 0,75	Bajo
2	0,75 – 1,5	Medio
3	1,5 – 3,0	Alto
4	> 3,0	Muy alto

Fuente: Pizarro, 1990

- **Sodicidad:**

Un alto contenido de sodio en el agua para riego trae consigo la pérdida de estructura por dispersión e hinchamiento.

- **Toxicidad:**

En el año de 1976, la FAO presenta la siguiente clasificación en función de la concentración de tres elementos: sodio (Na), cloro (Cl) y boro (B).

Tabla 6. Criterios de toxicidad según la FAO

Ión	Concentración (meq/l)		
	Inexistentes	Crecientes	Graves
Na	< 3	3 – 9	> 9
Cl	< 4	4 – 10	> 10
B	< 0,7	0,7 – 2,0	> 2,0

Fuente: Pizarro, 1990

3.6. El riego por aspersión

El riego por aspersión implica una lluvia más o menos intensa y uniforme sobre la parcela con el objetivo de que el agua se infiltre en el mismo punto donde cae (Tarjuelo, 2005).

Según Tarjuelo (2005), en los sistemas de aspersión y goteo utilizan dispositivos de emisión o descarga en los que la presión disponible en las tuberías portaemisores (laterales de riego) induce un caudal de salida. La diferencia entre ambos métodos radica en la magnitud de la presión y la forma del emisor.

3.6.1. *Ventajas y desventajas del riego por aspersión:*

Según Tarjuelo (2005) dentro de las principales ventajas destacan:

- 1) No necesita de nivelaciones, adaptándose a terrenos ondulados.
- 2) Pueden conseguir altos grados de automatización, logrando ahorros en mano de obra.
- 3) Según la modalidad, permite el reparto de fertilizantes (riego por goteo).
- 4) Evita la construcción de acequias y canales aumentando la superficie útil.
- 5) Es el método más eficaz para el lavado de sales por originar un movimiento de agua en el suelo.

Tarjuelo (2005), cita las siguientes desventajas:

- 1) Mala uniformidad en el reparto de agua por la afectación de los fuertes vientos.
- 2) Alto costo inicial y elevado mantenimiento.
- 3) Posible efecto de la aspersión sobre plagas y enfermedades.

3.6.2. Tipos de sistemas de aspersión:

Villalobos (2011), hace la siguiente clasificación para los sistemas de riego por aspersión.

- **Aspersión tradicional:**

Es el sistema más utilizado y es como inició el riego por aspersión. Para regar toda el área mediante este método, se deben de trasladar líneas de tuberías con aspersores de forma manual. Trabajan con presiones que rondan entre 2,5 y 3 atmósferas.

- **Sistemas autopropulsados:**

Tienen la característica que avanzan a medida que se efectúa el riego, ya que tienen un sistema que les permite desplazarse. Trabajan con presiones superiores a 3,5 kg/cm². Dentro de los más conocidos están: cañones móviles, pivotes centrales y máquinas de avance lineal.

3.6.3. Clasificación de los sistemas tradicionales:

Villalobos (2011), los clasifica de la siguiente manera:

- a) **Sistemas permanentes:**

Utilizados para regar áreas pequeñas, pero pueden utilizarse también para regar áreas extensas cuando el diseño es por gravedad, aprovechando una diferencia de cotas.

Las tuberías están en forma permanente en el campo, funcionando generalmente con uno o dos laterales. Los aspersores no están fijos en el campo, ya que presenta un mecanismo de acople rápido que les permite instalarlos donde se desee.

- b) **Sistemas portátiles:**

Usados en áreas que requieren riegos complementarios.

En este tipo de sistema es todo móvil, por lo que las tuberías deben de ser de bajo peso para su traslado en el campo.

c) Sistemas semi-portátiles:

En este tipo de sistemas las tuberías principales son permanentes y en algunas ocasiones también las secundarias, ya que las tuberías móviles son los laterales (donde están los aspersores).

d) Sistemas sólidos:

Este tipo de sistema es todo fijo en el campo, utilizando para su funcionamiento aspersores que trabajan con presiones medias a bajas. Se diferencia de un sistema permanente en que los aspersores funcionan a la vez como un bloque, regando una sección del terreno a la vez. El sistema consta de una tubería principal o secundaria que suministra el agua a las tuberías de distribución (múltiple) de donde salen los laterales, que pueden ir a ambos lados de la múltiple.

3.6.4. Componentes de un sistema de riego por aspersión:

Para Villalobos (2011), dentro de los principales componentes en un sistema de riego por aspersión se destacan:

a) La fuente de agua:

Esta puede ser superficial, subterránea o combinada, para que sea económicamente factible se requiere de un caudal continuo.

b) La fuente de energía:

En el riego por aspersión se requieren altas presiones, esta presión puede ser suministrada por una bomba o por una diferencia de cotas entre la fuente de agua y el sitio a regar.

Debido al alto costo de los combustibles se prefieren bombas acopladas a motores eléctricos, ya que la electricidad presenta una serie de ventajas como: equipos más económicos, menor costo de mantenimiento de los equipos y facilidad de automatización.

c) Tuberías:

Las tuberías más utilizadas en el país son:

- *P.V.C:*

Ver el anexo 15 para observar las características técnicas de estas tuberías.

- *Polietileno:*

Son más baratas que las tuberías de P.V.C para diámetros inferiores a los 50 mm. Existen dos tipos: polietileno de baja densidad (blando) y de alta densidad (duro). Las tuberías comúnmente presentan las siguientes presiones de trabajo: 8, 6, 4 y 2,5 kg/cm².

- *Poliducto:*

Es una manguera negra, no soporta los rayos ultravioleta por lo que se debe de enterrar. Es más barata que el polietileno.

d) Emisores de agua:

Son los dispositivos que controlan la salida del agua, desde las tuberías laterales, en puntos discretos o continuos (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

Se clasifican en:

- *Aspersores:*

Según Villalobos (2011), funcionan por la acción del chorro de agua, el cual choca con el director de flujo y lo defleca. Los caudales de los aspersores son variables, desde los 0,3 hasta 40 o más m³/h con un rango de descarga de 10 hasta los 60 metros de columna de agua (m.c.a.).

- *Goteros:*

Son emisores con caudales no superiores a 16 l/h. En ellos se produce una disipación de energía que para caudales inferiores de 8 l/h es casi total, por lo que el agua sale gota a gota (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

- *Miniaspersores:*

Son aspersores de baja presión y caudal, de alcance pequeño, no superior a los 3 m (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

- *Difusores:*

Son emisores por cuyo orificio de salida se lanza agua al exterior con la suficiente presión para permitir su difusión en el aire (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

3.7. Diseño hidráulico de un sistema de riego por aspersión

3.7.1. Pérdidas de carga:

Las pérdidas de carga por fricción que ocurren en una tubería lateral, se pueden calcular según el diámetro de la tubería, el número de emisores, descarga por emisor y espaciamiento entre emisores (Villalobos, 2011).

Para el cálculo de dichas pérdidas se utiliza la ecuación de Hazen Williams que se muestra a continuación:

$$H_f = 1,131 \times 10^9 \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \cdot D^{-4,872} \cdot L \dots \dots (20)$$

Donde:

- ✓ H_f : pérdidas por fricción a lo largo de la tubería (m.c.a.).
- ✓ Q : caudal de la tubería (m^3/h).
- ✓ D : diámetro interno de la tubería (mm).
- ✓ C : coeficiente de Hazen Williams. Depende del material (adimensional).
- ✓ L : longitud de la tubería (m).

Se brindan a continuación, algunos valores del coeficiente C :

Tabla 7. Valores del coeficientes C, 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

Fuente: Villalobos, 2011.

Para Villalobos (2011), en un lateral el caudal va decreciendo y las pérdidas de carga, también van decreciendo desde la entrada del lateral hacia el final.

Según el número de emisores de salida que presente la tubería lateral, existe un coeficiente F, desarrollado por Christiansen, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 8. Coeficiente F, según la posición y el número de emisores en el lateral

Número de salidas	F_1^a	F_2^b	F_3^c
5	0,469	0,337	0,410
10	0,415	0,350	0,384
12	0,406	0,352	0,381
15	0,398	0,355	0,377
20	0,389	0,357	0,373
25	0,384	0,358	0,371
30	0,381	0,359	0,370
40	0,376	0,360	0,368
50	0,374	0,361	0,367
100	0,369	0,362	0,366
200	0,366	0,363	0,365

Fuente: Villalobos, 2011

Donde:

- ✓ F_1^a : cuando el primer emisor está ubicado a una distancia igual al espaciamiento utilizado para ellos a partir del principal.
- ✓ F_2^b : cuando la primera salida está muy cerca de la entrada del lateral.
- ✓ F_3^c : Cuando la primera salida está a $\frac{1}{2}$ del espaciamiento entre emisores.

Christiansen citado por Villalobos (2011), desarrolló la serie del factor F, determinando lo siguiente:

- Cuando el primer emisor está ubicado a una distancia igual al espaciamiento utilizado para ellos a partir del principal:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \dots (21)$$

- Cuando el primer emisor está muy cerca de la entrada del lateral:

$$F = \frac{N \left[\frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \right] - 1}{N-1} \dots (22)$$

Donde:

- ✓ N: número de salidas que presenta la tubería múltiple o lateral.
- ✓ m: 1,760 para las tuberías de plástico.

La pérdida de carga en un lateral con múltiples salidas, viene dada por la siguiente ecuación:

$$Hf = 1,131 \times 10^9 \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \cdot D^{-4,872} \cdot L \cdot F \dots (23)$$

Donde:

- ✓ Hf: pérdidas por fricción a lo largo de la tubería (m.c.a.).
- ✓ Q: caudal de la tubería (m^3/h).
- ✓ D: diámetro interno de la tubería (mm).
- ✓ C: coeficiente de Hazen Williams (adimensional).

- ✓ L: longitud de la tubería (m).
- ✓ F: factor que depende del número de salidas en el lateral (decimal).

3.7.2. Pérdidas secundarias de carga:

Las pérdidas secundarias son aquellas que ocurren por la conexión de elementos adicionales a las tuberías (válvulas, conexión de las líneas de alimentación al múltiple, por ejemplo).

Para Villalobos (2011), se calculan como las pérdidas de carga que ocurren en los accesorios, más el 5% de la suma de la presión de entrada en la tubería múltiple más las pérdidas por fricción que ocurren en la tubería principal, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Hf_{sec} = Hf_{accesorios} + 0.05(Hf_{princ} + P_{mult}) \dots \dots (24)$$

Donde:

- ✓ Hf_{sec} : pérdidas secundarias en la tubería (m.c.a.).
- ✓ $Hf_{accesorios}$: pérdida de carga por accesorios (m.c.a.).
- ✓ Hf_{princ} : pérdida de carga en la tubería principal (m.c.a.).
- ✓ P_{mult} : presión de entrada en la múltiple (m.c.a.).

3.7.3. Regla del 20%:

Por norma general una tubería lateral se debe de diseñar con una diferencia de la presión del 20%, lo que quiere decir una diferencia de presión entre el primer y el último emisor debe ser $\leq 20\%$ de la presión de operación del emisor. Esto representa una diferencia del 10% en el caudal entre el primer y último emisor (Villalobos, 2011).

3.7.4. Pérdidas admisibles según la posición del lateral:

Según Villalobos (2011), la máxima pérdida admisible va a depender de la posición en la que se encuentre el lateral, ya sea contrapendiente, a favor de la pendiente o en terreno plano.

En un lateral colocado a nivel, la pérdida admisible viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{adm} = 0,2 \cdot P_0 \dots (25)$$

Donde P_0 es la presión media de operación del emisor.

Para un lateral en pendiente, la pérdida admisible viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{adm} = 0,2 \cdot P_0 \pm \Delta Z \dots (26)$$

Donde:

- ✓ P_{adm} : pérdida admisible de carga (m.c.a.).
- ✓ P_0 : presión de operación del gotero (m.c.a.).
- ✓ ΔZ : diferencia de cotas entre el inicio y final del lateral de goteo (m).

El ΔZ es positivo si el lateral baja y negativo si sube.

3.7.5. Cálculo de presión a la entrada del lateral:

Para un lateral sobre terreno plano, la presión de entrada (P_e) en un sistema autocompensado, se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$P_e = P_0 + hf \dots (27)$$

Donde:

- ✓ P_e : presión de entrada del lateral (m.c.a.).
- ✓ hf : pérdidas por fricción a la largo del lateral (m.c.a.).

Para un lateral en pendiente, la presión de entrada al lateral (P_e) en un sistema autocompensado, se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$P_e = P_0 + hf \pm \Delta Z \dots (28)$$

Donde:

- ✓ P_e : presión de entrada del lateral (m.c.a.).
- ✓ hf : pérdidas por fricción a la largo del lateral (m.c.a.).
- ✓ ΔZ : diferencia de cotas entre el inicio y final del lateral (m).

El ΔZ es positivo si el lateral sube y negativo si baja.

3.7.6. *Sistemas sólidos:*

Menciona Villalobos (2011), que cuando se diseña un sistema sólido, la tubería múltiple se comporta de la misma forma que un lateral, por lo que se debe de cumplir la Regla de 20%, distribuido en el lateral y en la múltiple.

Esto se hace consumiendo parte de lo admisible en el lateral y la otra parte en la múltiple (Villalobos 2011).

Para calcular la presión a la entrada en la tubería múltiple en un sistema autocompensado, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_m = P_e + hf_{mult} \pm \Delta Z \dots (29)$$

Donde:

- ✓ P_m : presión a la entrada de la múltiple (m.c.a.).
- ✓ P_e : presión a la entrada del lateral (m.c.a.).
- ✓ hf_{mult} : pérdidas por fricción en la tubería múltiple (m.c.a.)
- ✓ ΔZ : diferencia de cotas entre el inicio y final de la múltiple (m).

El ΔZ es positivo si la tubería múltiple sube y negativo si baja.

3.7.7. *Presión distal:*

Para el cálculo de la presión distal en un lateral, se emplea la siguiente ecuación:

$$P_d = P_{mult} - Hf_{mult} - Hf_{lat} \dots (30)$$

Donde:

- ✓ P_d : presión distal en el lateral de goteo (m.c.a.).
- ✓ P_{mult} : presión a la entrada de la múltiple (m.c.a.).
- ✓ Hf_{mult} : pérdidas por fricción a lo largo de la múltiple (m.c.a.).
- ✓ Hf_{lat} : pérdidas por fricción a lo largo del lateral de goteo (m.c.a.).

3.7.8. *Diámetro de la tubería múltiple o de distribución:*

Para calcular el diámetro adecuado para una tubería múltiple, se emplea la siguiente ecuación:

$$D = \left[\frac{1,131 \times 10^9 \cdot Q^{1,852} \cdot F}{Hf \cdot C^{1,852}} \right]^{0,2054} \dots \dots (31)$$

Donde:

- ✓ D: diámetro de la tubería múltiple (mm).
- ✓ Q: caudal de la múltiple (m³/h).
- ✓ F: factor F, que depende del número de salidas y la posición de la primera salida con respecto a la tubería múltiple (decimal).
- ✓ Hf: pérdida de carga admisible en la múltiple (m.c.a.).
- ✓ C: coeficiente de Hazen Williams (adimensional).

3.7.9. Cálculo del diámetro de la tubería principal:

Se utiliza el método de Carga Unitaria, que consiste en seleccionar un diámetro de tubería del tal forma que las pérdidas por fricción no sobrepasen el límite establecido de 2,30 m.c.a. por cada 100 m de tubería (Villalobos, 2011).

Para este caso las pérdidas están expresadas en m/m (0,023 m.c.a. por cada metro lineal de tubería).

Se emplea la siguiente ecuación para el cálculo del diámetro de la tubería principal:

$$D = \left[\frac{1,131 \times 10^9 \cdot Q^{1,852}}{0,023 \cdot C^{1,852}} \right]^{0,2054} \dots \dots (32)$$

Donde:

- ✓ D: diámetro de la tubería múltiple (mm).
- ✓ Q: caudal de la tubería principal (m³/h).
- ✓ C: coeficiente de Hazen Williams (adimensional).

3.7.10. Velocidad permisible dentro de las tuberías:

Lo ideal es que la velocidad dentro de las tuberías se encuentren entre 1 a 3 m/s. Una velocidad inferior a 1 m/s produce la sedimentación de los sólidos que se encuentren dentro de ellas. Una velocidad superior a los 3 m/s, produce un aumento en las pérdidas por fricción a lo largo de una tubería principal o de distribución.

La velocidad dentro de una tubería se determina mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{A} \dots \dots (33)$$

Donde:

- ✓ V: velocidad del agua dentro de la tubería (m/s).
- ✓ Q: caudal a transportar por la tubería (m³/s).
- ✓ A: área de la tubería (m²).

Para determinar el área de una tubería, se utiliza la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \dots \dots (34)$$

Donde:

- ✓ A: área de la tubería (m²).
- ✓ π : constante matemática (3,14).
- ✓ D: diámetro de la tubería (m).

3.8. El riego por goteo

Para Rodrigo, Hernández, Pérez, & González (1992), se llama así a los sistemas que aplican el agua con caudal no superior a 16 l/h por punto de emisión o metro lineal de manguera de goteo.

A diferencia de la mayoría de los sistemas de riego, el riego por goteo solo, humedece una parte del suelo, mientras que los demás sistemas todo el suelo (Villalobos, 2011).

3.8.1. Ventajas del riego por goteo:

Villalobos (2011), cita las siguientes ventajas sobre los sistemas de riego por goteo:

1) Ahorro en el consumo de agua:

El desarrollo radicular de un cultivo regado por goteo se limita a un área pequeña.

2) Aplicación de agroquímicos con el sistema:

Se puede aplicar agroquímicos, ya que estos van directamente a la zona radicular.

3) Baja presión de operación:

Existe un ahorro de energía por la alta eficiencia, sino también por la baja presión y el menor caudal del sistema.

4) Reducción de enfermedades fungosas:

Al no mojarse el follaje se reducen las enfermedades causadas por hongos y bacterias.

3.8.2. Desventajas del riego por goteo:

Villalobos (2011), menciona las siguientes desventajas:

1) Alto costo inicial:

Son equipos con un alto costo inicial comparado con los sistemas de riego por aspersión.

2) Obstrucción de goteros:

Si estos se obstruyen no se puede aplicar el riego en forma eficiente.

3) Afectado por roedores:

Al existir tuberías expuestas, estas pueden ser dañadas por los roedores.

3.8.3. Componentes de un equipo de riego por goteo:

Dentro de los principales componentes de un equipo de riego por goteo se encuentran los siguientes dispositivos:

a) Grupo de presión:

Según Moya (2009) las bombas que utilizan los sistemas de riego son centrífugas, porque aprovechan la fuerza centrífuga que se origina al girar la turbina, para impulsar el agua.

El nombre de centrífuga obedece a que las partículas siguen una trayectoria centrífuga y una fuerza de esta naturaleza es la que aumenta la energía de la corriente líquida (Tarjuelo, 2005).

Para Tarjuelo (2005), una bomba centrífuga simple se compone de los siguientes elementos:

- **Un distribuidor:**

Es un dispositivo que consiste en un estrechamiento gradual de la sección que lleva el líquido, desde la tubería de aspiración hasta la entrada del impulsor.

- **El impulsor:**

Está formado por una serie de álabes diversos, unidos al eje que recibe la energía de exterior (de un motor) para el funcionamiento de la máquina.

- **Corona directriz:**

Constituido por álabes fijos divergentes que recogen el líquido que sale del impulsor y tienen la misión de disminuir la velocidad, transformando la altura cinética en presión.

- **Cuerpo de la bomba:**

Formado por dos piezas en forma de caracol, y que encierra el impulsor y la corona directriz. La sección creciente del cuerpo de la bomba también contribuye a transformar la energía cinética en presión, lo mismo de la corona directriz.

- **Cono:**

También contribuye a transformar la energía cinética en presión.

Moya (2009), toma en cuenta los siguientes factores a la hora de seleccionar una bomba centrífuga:

- ✓ Aspiración:

Distancia o altura, entre el nivel del agua y el eje de la bomba. No debe de superar los siete metros.

✓ Impulsión:

Distancia o altura a la que se quiere llevar el agua, desde el eje de la bomba. En teoría no tiene un límite.

b) Equipo de filtrado:

Es la operación más importante del sistema. Entre los elementos más importantes destacan:

• *Decantadores:*

Para Pizarro (1990), son una solución sencilla y económica para la eliminación de los sólidos en suspensión (arenas, limos y arcillas) y algunos precipitados químicos (hierro) que se forman al airearse el agua.

La sedimentación de las partículas se da por cuatro factores que ocurren en forma simultánea:

- ✓ Sedimentación libre, que tiene lugar cuando la concentración de sólidos es baja.
- ✓ Las partículas, flocculan durante el proceso de sedimentación, aumentando de tamaño y la velocidad de sedimentación.
- ✓ Las partículas se encuentran en concentración inmediata y las fuerzas de atracción entre ellas retrasan la formación de depósitos.
- ✓ La concentración de partículas es tan alta que forma una estructura que sólo se deposita por la compresión originada por el peso de las nuevas partículas.

• *El hidrociclón:*

Es un aparato sin elementos móviles, que permite eliminar las partículas con un tamaño superior a 74 micras (equivalente a 200 mesh).

El agua cargada de arena entra en el hidrociclón tangencialmente a la parte superior cilíndrica, provocando un torbellino descendente. La fuerza centrífuga provocada por ese torbellino proyecta la partículas sólidas contra las paredes de la parte cónica, que

descienden hasta el tubo inferior, que las conduce al depósito de sedimentos (Pizarro, 1990).

Según Pizarro (1990), las pérdidas de carga en estos aparatos rondan de 3 a 7 m.c.a.

- *Filtros de arena:*

Consisten en tanques metálicos o de poliéster, en cuyo interior se coloca una gruesa capa de arena a través de la cual pasa el agua a filtrar (Pizarro, 1990).

Para Moya (2009), su instalación es necesaria cuando el agua procede ríos, acequias o estanques abiertos.

El agua entra por la parte superior y desciende atravesando la capa de arena, reteniendo todas las impurezas, a mayor longitud de capa de arena mejor es el infiltrado.

Cuando las pérdidas de carga superan los 3 m.c.a. se deben de limpiar, variando el flujo del agua dentro de los filtros.

- *Filtro de malla:*

Consisten en un cuerpo cilíndrico, de plástico o metálico, en cuyo interior hay un cilindro de malla de plástico o acero inoxidable (Moya, 2009).

El agua penetra en el filtro por el centro y atraviesa sus paredes para continuar su salida a la red general.

Estos filtros realizan una retención superficial de las impurezas, lo que hace su colmatación sea mucho rápida. Se suelen utilizar con aguas no muy sucias que contengan partículas de tipo inorgánico (Pizarro, 1990).

Moya (2009), cita las siguientes características técnicas a tomar en cuenta a la hora de seleccionar un filtro de este tipo:

- ✓ Grado de filtración (mesh o milímetros).
- ✓ Caudal máximo recomendado.
- ✓ Presión de trabajo, máxima y mínima.
- ✓ Longitud del cilindro del filtro.

- ✓ Área de filtraje.
- ✓ Pérdidas de carga

- *Filtro de anillos:*

Para Pizarro (1990), en estos filtros el elemento filtrante es un conjunto de anillos ranurados que se comprimen unas con otras al roscar la carcasa, formando un cilindro de anillos.

c) Equipos de inyección de fertilizante (fertirriego):

Sobresalen los siguientes elementos:

- *Tanques de fertilización:*

Para Pizarro (1990), consisten en un depósito conectado en paralelo a la red de riego. El tanque debe de resistir la presión de la red.

Para Moya (2009), para su funcionamiento se llena de agua por la mitad, luego se añade el abono disuelto y se cierra herméticamente la tapa.

Según Pizarro (1990), los tanques de abonado son muy populares, debido a su bajo costo y a que no necesitan energía para su funcionamiento, ya que aprovechan la presión del agua de riego, permitiendo su uso en cualquier punto de la red. Presentan dos inconvenientes principales:

- ✓ La concentración del abono no es constante a lo largo de cada riego.
- ✓ Se debe de reponer el abono del tanque en cada riego, lo que limita la automatización.

- *Inyectores Venturi:*

Son dispositivos que consisten en una pieza, en forma de T que en su interior tiene un tubo Venturi. El Venturi causa un rápido aumento de la velocidad del agua, que origina una succión que introduce la solución fertilizante a la red. Este dispositivo se acopla a la tubería principal de riego (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

Para Moya (2009), este dispositivo presenta las siguientes desventajas:

- ✓ Elevadas pérdidas de presión que sufre la instalación, superiores a los 10 m.c.a.
- ✓ La falta de uniformidad, en algunos casos.

- *Dosificadores eléctricos:*

Para Moya (2009), son los que presentan menos problemas, ya que no producen pérdidas de carga en la red, ni consumen o desperdician agua y son muy fáciles de regular. Pueden ser de membrana o de pistón.

Para Pizarro (1990), los caudales varían según los modelos desde los 20 l/h hasta más de 600 l/h. La presión de trabajo de estos equipos ronda entre 40 y 120 m.c.a.

El principal inconveniente de estos equipos es la necesidad de suministro eléctrico y su precio. Se construyen en materiales no corrosivos.

- *Dosificadores hidráulicos:*

Es una bomba construida por una pequeña cámara que alternadamente se llena y vacía, accionada por la presión de la red de riego. Cuando la cámara se llena, el dosificador succiona abono del depósito y cuando se vacía, lo inyecta al sistema (Pizarro, 1990).

Según Pizarro (1990), estos aparatos presentan las siguientes ventajas:

- ✓ No necesitan más fuente de energía que la presión de la red.
- ✓ Se puede regular el caudal, normalmente entre los 20 y 300 l/h.
- ✓ Son portátiles.
- ✓ No provocan pérdidas de carga a la red.

Según Pizarro (1990), dentro de las desventajas se encuentran:

- ✓ Necesitan una presión mínima de operación de 20 m.c.a.
- ✓ Elevado precio.

d) Válvulas y mecanismos de seguridad:

Para Moya (2009), dentro de las principales válvulas se encuentran:

- *Válvulas de paso:*

Sirven para abrir o cerrar una conexión o tubería. Cerrando parte de ella sirven para regular la presión aguas abajo, disminuyendo hasta alcanzar la adecuada.

- *Válvula compuerta:*

Cierran o abren poco a poco mediante rosca. Están muy indicadas para poner a funcionar una bomba hidráulica.

- *Válvula de bola o esfera:*

El cierre es muy perfecto. Normalmente para tuberías de diámetro pequeño o mediano.

- *Válvula hidráulica:*

Aprovechan la presión del agua para abrir o cerrar, mediante un diafragma o pistón.

- *Electro-válvula:*

Es una válvula automatizada por una bobina. Sirve para el control de caudales.

Dentro de los elementos de seguridad en un sistema de riego por goteo, se destacan los siguientes elementos:

- *Reguladores de presión:*

Son dispositivos capaces de regular la presión de salida dentro de un rango de presiones de entrada en el cual actúan eficientemente.

El mecanismo que acciona la mayor parte de los reguladores es un pistón con un muelle, que se mueve dentro de una carcasa provocando el estrangulamiento del paso del agua (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

Para Tarjuelo (2005), los reguladores de presión tienen dos misiones fundamentales:

- ✓ Garantizar la uniformidad de riego, al igualar las presiones de funcionamiento en los distintos puntos de la instalación.
- ✓ Evitar presiones excesivas en las tuberías.

Según Moya (2009), para un regulador se debe de tomar en cuenta las siguientes características técnicas:

- ✓ Caudal máximo y mínimo.
- ✓ Presión máxima y mínima de operación.
- ✓ Relación de presión (entrada/salida).
- ✓ Material de los diferentes componentes del regulador.

Según Pizarro (1990), un regulador debe de cumplir con los siguientes requisitos:

- ✓ Pérdida de carga lo más reducida posible.
- ✓ El funcionamiento del regulador no debe de ser afectado por la presencia de limo, arena, algas, etc., en el agua de riego.
- ✓ Construcción y montaje deben de ser simples, con pocas necesidades de mantenimiento.
- ✓ El rango de regulación debe de ser como mínimo tres veces la presión nominal.

- *Válvulas de sobrepresión o de alivio:*

Para Moya (2009), las conducciones de agua a presión pueden sufrir sobrepresiones, debido a los golpes de ariete, que se originan cuando existe un cambio en el régimen de circulación.

Dentro de las causas que originan un golpe de ariete se encuentran:

- ✓ Presencia de aire.
- ✓ Cierre rápido de una llave de paso.
- ✓ Arranque y parada de la bomba.

Se instalan en derivación automatizándose mediante un piloto hidráulico.

- *Válvulas de retención:*

Para Moya (2009), estas válvulas permiten el paso del agua en un solo sentido, evitando en muchos casos el vaciado de las bombas y los golpes de ariete.

Son de gran importancia cuando las tuberías son ascendentes, y se deben de colocar en varios tramos para impedir el vaciado de los mismos.

Algunas características técnicas a tomar en cuenta son:

- ✓ Presión máxima de trabajo.
- ✓ Pérdidas de carga.
- ✓ Diámetro.

- *Válvulas para la evacuación de aire:*

Para Villalobos (2011), son llamadas comúnmente con el nombre de ventosas, son dispositivos que permiten la evacuación del aire a medida que este se va acumulando, por lo que se deben de instalar en los puntos altos de la tubería.

Existen una serie de recomendaciones para que el aire se acumule en los puntos altos de la tubería, entre las que se encuentran:

- ✓ La tubería debe tener cierta pendiente con el fin de que el aire se situé en la parte más alta.
- ✓ Si el perfil es muy irregular se deben de prever subidas suaves y bajas pronunciadas para que el aire se acumule en los puntos altos.
- ✓ Cuando la topografía sea totalmente plana se deben provocar ciertos desniveles en la instalación con el fin de que el aire se acumule en los puntos altos.

a) Goteros:

Para Dansberg y Bresler (1985) citado por Villalobos (2011), los goteros, son los componentes principales de un sistema de riego por goteo, ya que son los últimos puntos del sistema por donde se aplica el agua al suelo en forma controlada.

Según Rázuri (1988) citado por Villalobos (2011), un gotero debe de cumplir con las siguientes características:

- ✓ Descarga baja, uniforme y constante (0,2 - 3,8 l/h), para una carga de 10 a 20 m.c.a.
- ✓ Debe poseer una sección hidráulica adecuada para evitar obstrucciones.
- ✓ Resistente a la contaminación química y ambiental.
- ✓ Reducida pérdida de carga en el sistema de conexión.

Los goteros se clasifican de la siguiente manera:

a) De orificio:

En ellos el agua sale al exterior a través de uno o varios orificios de pequeño diámetro, en donde tiene lugar la mayor pérdida de carga. Son muy sensibles a las obturaciones (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

Para Pizarro (1990), la relación caudal – presión de estos goteros, viene representada por la siguiente ecuación:

$$Q = 3,6 \cdot a \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \dots \dots (35)$$

Donde:

- ✓ Q: caudal (l/h).
- ✓ a: sección de paso (mm²).
- ✓ C: coeficiente del orificio (adimensional).
- ✓ g: 9,81 m/s².
- ✓ h: presión (m.c.a.).

b) Vortex:

Es un gotero de orificio en el que el agua, después de atravesar la perforación, se ve obligada a circular por una cámara donde entra tangencialmente, originando un flujo vorticial (Pizarro, 1990).

Según Pizarro (1990), la ecuación de un gotero tipo Vortex es:

$$Q = 15,9 \cdot a \cdot C \cdot h^{0,4} \dots \dots (36)$$

Donde:

- ✓ Q: caudal (l/h).
- ✓ a: sección de paso (mm²).
- ✓ C: coeficiente de descarga (adimensional).
- ✓ h: presión (m.c.a.).

c) Autocompensandos:

Se trata de goteros con un flujo turbulento o transitorio en los que se intenta obtener un caudal constante independientemente de la presión. La autorregulación se consigue mediante una pieza móvil y flexible de caucho que se deforma bajo la presión, disminuyendo la sección de paso del agua y limitando así el caudal (Rodrigo, Hernández, Pérez, & González, 1992).

Para Pizarro (1990), el principal inconveniente que presentan estos goteros es que el material plástico experimenta envejecimiento bajo la acción combinada de las temperaturas y presiones a los que se ve sometidos, así como por el uso de agentes químicos como los abonos y ácidos que lleva el agua de riego.

d) De laberinto:

En ellos se obliga a agua a recorrer una trayectoria tortuosa, funcionando en régimen turbulento, con lo que son poco sensible a los cambios de temperatura y a las obturaciones (Pizarro, 1990).

3.9. Diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo

3.9.1. Uniformidad de riego:

Para Pizarro (1990), es una magnitud que caracteriza a todo sistema de riego y que además interviene en su diseño, tanto en lo agronómico como en lo hidráulico.

Según Rodrigo, Hernández, Pérez, & González (1992), la uniformidad de riego depende de los siguientes aspectos:

- ✓ Las diferencias de presión que se producen en la red, debido a pérdidas de carga.
- ✓ La falta de uniformidad en la fabricación de los goteros.
- ✓ Del número de goteros que recibe agua la planta.
- ✓ La respuesta del gotero a la temperatura y a la presión.
- ✓ La variación de las características del gotero con su uso por las posibles obturaciones o envejecimiento.

Para Pizarro (1990), el coeficiente más popular para medir este aspecto lo constituye el coeficiente de uniformidad de Christiansen, que viene dado por la expresión:

$$CU = \frac{q_{25\%}}{q_m} \dots \dots (37)$$

Donde:

- ✓ $q_{25\%}$: media del 25% de las observaciones de más bajo valor.
- ✓ q_m : media de todos los valores.

Para Rodrigo, Hernández, Pérez, & González (1992), si se consideran los aspectos que intervienen en la uniformidad de riego, se establece la siguiente expresión para calcular la uniformidad de riego:

$$CU = 100 \left(1 - \frac{1,27 \cdot CV}{\sqrt{e}} \right) \left(\frac{q_n}{q_a} \right) \dots \dots (38)$$

Donde:

- ✓ CU: uniformidad de riego.
- ✓ CV: coeficiente de variación de fabricación del emisor.
- ✓ e: número de goteros de los que recibe agua la planta.
- ✓ q_n : caudal mínimo del gotero que corresponde a una presión mínima.
- ✓ q_a : caudal medio de todos los goteros considerados.

Para Pizarro (1990), el coeficiente de variación del gotero, se define como el división entre la desviación estándar y el caudal medio, tal como lo muestra la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{S}{Q_m} \dots \dots (39)$$

Donde:

- ✓ Cv: coeficiente de variación del gotero.
- ✓ S: desviación estándar del gotero.
- ✓ Q_m: caudal medio de los goteros.

Según Keller y Karmelli citados por Villalobos (2011), para considerar una instalación aceptable, el coeficiente CU deber ser superior al 90 %.

Merriam y Keller (1978), citado por Rodrigo, Hernández, Pérez, & González (1992), establecieron un coeficiente de uniformidad basado en la presión, que se representa por la siguiente ecuación:

$$CU_p = \left(\frac{P_{25\%}}{P_{med}} \right)^x \cdot 100 \dots \dots (40)$$

Donde:

- ✓ P_{25%}: presión media del 25% de las más bajas (m.c.a.).
- ✓ P_{med}: presión media de la sección a evaluar (m.c.a.).
- ✓ x: exponente de descarga del gotero.

Según Villalobos (2011), el valor de CU_p, debe ser igual o superior al 90 %. Valores que rondan entre el 80 y 90 % se consideran buenos, entre un 70 y 80% son aceptables y menores al 70% son inaceptables.

Para el diseño de las tuberías principales y de distribución, se utilizan los principios del riego por aspersión, visto en los apartados anteriores.

3.9.2. Porcentaje de suelo humedecido (PAR):

Para Villalobos (2011), en el riego por goteo no se humedece el 100% del área; sino que un pequeño porcentaje. Se ha comprobado que regando el 50% de área del potencial de las raíces se han obtenido excelentes resultados.

En cultivos con espaciamiento corto la mayor parte del volumen de suelo puede ser humedecido. En cultivos donde el riego se usa complemento se podrían aceptar valores de PAR de hasta un 20%. Para un gotero el PAR debe oscilar entre un 30 y un 70%.

Para calcular el PAR, se utiliza la siguiente figura:

Espaciamiento entre laterales (m)	Descarga del gotero (lts/h)														
	Menos 1.5			2			4			8			Más de 10		
	Textura														
	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina
Espaciamiento entre goteros (m)															
0.2	0.5	0.9	0.3	0.7	1	0.6	1	1.3	1	1.3	1.7	1.3	1.6	2	
Porcentaje de área bajo riego (%)															
0.8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
1	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	
1.2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	
1	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	
1.5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	
2	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	
2.5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	
3	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	
3.5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	43	57	46	57	
4	8	18	28	10	20	20	20	30	40	30	40	50	40	50	
4.5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	
5	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	
6	5	12	20	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	

Figura 7. Cuadro para el cálculo del PAR

3.10. Diseño agronómico en riego por goteo

3.10.1. Lámina neta:

El valor de la lámina neta, viene dado por la siguiente expresión:

$$Ln = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Pe \cdot Prof \cdot Ag \cdot PAR \dots (41)$$

Donde:

- ✓ Ln: lámina neta a aplicar (cm, mm, etc.).
- ✓ CC: capacidad de campo (%).
- ✓ PMP: punto de marchitez permanente (%).
- ✓ Pe: peso específico aparente del suelo (g/cm³).
- ✓ Prof: profundidad radicular del cultivo (cm, mm, etc.).
- ✓ Ag: agotamiento permitido (decimal).
- ✓ PAR: área mojada (decimal).

3.10.2. Frecuencia de riego en riego por goteo:

Se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$FR = \frac{Ln}{Etrg} \dots (42)$$

Donde:

- ✓ Fr: frecuencia de riego (días).
- ✓ Ln: lámina neta (cm, mm, etc.).
- ✓ Etrg: evapotranspiración real para riego por goteo (mm/día, cm/día, etc.).

La Etrg se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$Etrg = Etr \cdot k_1 \dots (43)$$

Donde:

- ✓ Etrg: evapotranspiración real para riego por goteo (mm/día, cm/día, etc.).
- ✓ k_1 : constante que depende del PAR (adimensional)

El valor de k_1 se obtiene de la siguiente ecuación:

$$k_1 = 0,1 + PAR \dots (44)$$

El valor de la frecuencia de riego debe de redondearse hacia el número entero menor. Luego debe de modificarse el valor de la lámina neta, según la ecuación la siguiente ecuación

$$Ln = Fr \cdot Etrg \dots (45)$$

Donde:

- ✓ Ln: lámina neta (cm, mm).
- ✓ Fr: frecuencia de riego (días).
- ✓ Etr: evapotranspiración real del cultivo (cm/día, mm/día).

Al recalcular la lámina neta, también se debe de recalcular la lámina bruta (Villalobos, 2008).

En riego por goteo, la eficiencia de aplicación ronda el 90%.

3.10.3. Tiempo de riego:

Para calcular el tiempo de riego en un sistema de riego, se emplea la siguiente ecuación:

$$TR = \frac{\text{Volumen}}{\text{Caudal del gotero}} \dots \dots (46)$$

Donde:

- ✓ El volumen es la lámina bruta por el área. Ésta área es la correspondiente a multiplicar el espaciamiento entre goteros e hileras.
- ✓ Caudal del gotero (l/h).

Agrupando todos los elementos anteriormente citados, se presenta un esquema de un sistema de riego por goteo, el cual se muestra a continuación:

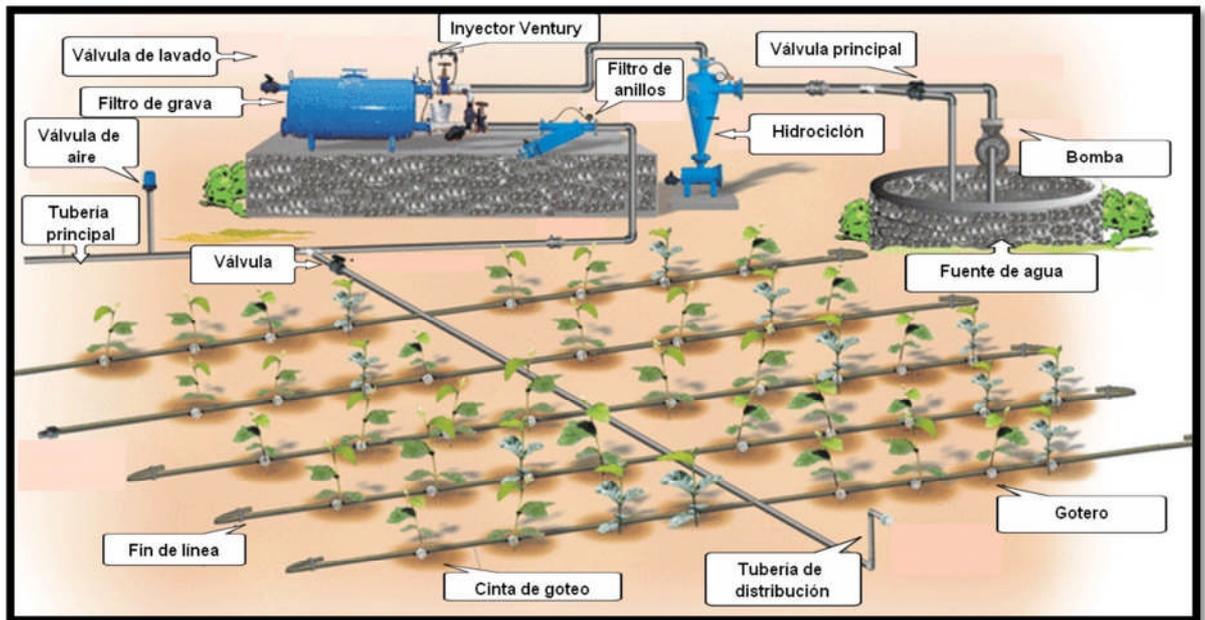


Figura 8. Esquema de un sistema de riego por goteo

3.11. El riego por goteo en caña de azúcar

Según Conejo (2013), el riego por goteo en caña de azúcar es utilizado en Costa Rica por las siguientes razones:

- Economía en el uso del agua.
- Reducción en los costos en el control de malezas.
- Mayor flexibilidad a la hora de la fertilización.
- Reducción en los costos de mano de obra
- El agua y los fertilizantes son depositados directamente en raíz para generar mayores rendimientos.

En lo relacionado a la ubicación de las mangueras de goteo con respecto a la planta, Conejo (2013), comenta que existen varias metodologías utilizadas en el país, siendo las más usadas una manguera por surco cuando existe un espaciamiento entre ellos de 1,50 a 1,75 m y el doble surco.

Cuando se utiliza la siembra de la caña en doble surco, el espaciamiento entre las líneas de goteo varía entre 1,80 a 2,40 m, el de plantas varía entre 0,40 a 0,60 m y la manguera se coloca en medio del doble surco, asegurando que de una sola línea de goteo abastezca de agua a las dos líneas de cultivo en medio de ella.

Conejo (2013), comenta que la manguera se debe de desplazar hacia la derecha o izquierda del centro de la planta entre 5 a 10 cm para evitar el estrangulamiento de las líneas de goteo por las raíces de la planta, sólo cuando se utiliza el espaciamiento de 1,50 a 1,75 m entre surco. La profundidad a la cual debe de ser colocada la manguera de goteo es de 10 cm para las dos metodologías mencionadas anteriormente.

Los espaciamientos recomendados entre goteros varían entre 0,30 a 0,50 m, con caudales que oscilan entre 1,00 a 1,50 l/h, esto representa un intensidad de aplicación de 2,00 mm/h por hectárea (Conejo, 2013).

Para Conejo (2013), las variedades que se han visto beneficiadas con aplicación del riego por goteo son aquellas conocidas como tempraneras (CP 72-2086, por ejemplo), ya que son estas variedades las que más aprovechan las ventajas del riego por goteo.

Según Conejo (2013), cuando se diseña un sistema de riego por goteo en caña de azúcar, se deben de ejecutar riegos de 18 horas y no de 24 horas, ya que se debe tener tiempo disponible para la ejecución de labores de mantenimiento y reparación del equipo de riego.

En lo referente al agotamiento permisible a utilizar en el riego por goteo en caña de azúcar, este va a depender de la fase de desarrollo en que se encuentre el cultivo, en la fase inicial se recomienda un agotamiento de 30% para que el agua se encuentre fácilmente disponible para la planta, luego en cuando el cultivo se encuentre en una fase adulta el agotamiento llega al 60% (Conejo, 2013).

En lo concerniente a la fertirriegación, Conejo (2013) comenta que existen dos elementos de gran importancia a tomar en cuenta, los cuales son:

- Que sean hidrosolubles.
- Compatibilidad entre los fertilizantes a utilizar en el riego.

La hidrosolubilidad hace referencia a que las fórmulas de fertilizante se puedan disolver fácilmente en el agua y la compatibilidad entre los abonos es señalada para evitar la formación de precipitados dentro de las mangueras, que pueden ocasionar la obstrucción de goteros.

Para Conejo (2013), los espesores de pared en las mangueras de goteo van en función de la textura que presenta en el suelo, utilizando espesores de pared de 1,20 mm o más cuando el suelo presenta una textura de pesado a medio, cuando el suelo es de una textura liviana se pueden utilizar espesores de 0,8 a 1,0 mm.

Cuando se utiliza el espaciamiento de 1,50 m entre surcos y a una manguera por surco, representa una longitud total de 6667 m de manguera por hectárea (Conejo, 2013).

Comenta Conejo (2013), que en los últimos años la tendencia en el riego por goteo es a la utilización de mangueras con goteros autocompensados y antisifón, las cuales presentan las siguientes ventajas:

- Distribución uniforme del agua en suelos con topografía irregular.
- Mayor longitud de surco (400 m).

- Previene la entrada de pequeñas partículas al interior de los goteros y de las mangueras, el conglomerado de esas partículas obstruye los goteros.

Como la principal desventaja se menciona el alto costo de éstas con respecto a aquellas que tienen goteros sin autocompensación.

3.12. Carga dinámica total

La carga dinámica total representa la presión que debe de suministrar la bomba para vencer los desniveles que existen en el terreno, así como las pérdidas de carga por fricción que existen a lo largo de la tubería, para conseguir así, la presión de operación del sistema.

La carga dinámica de la bomba se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$CDT = \Delta Z_{A-B} + Hf_{prin} + Hf_{sec} + P_{mult} \dots \dots (47)$$

Donde:

- ✓ CDT: carga dinámica de la bomba (m.c.a.).
- ✓ ΔZ_{A-B} : diferencia de cotas entre el espejo de agua y válvula más crítica del sistema (m).
- ✓ Hf_{prin} : pérdidas de carga primarias a lo largo de tubería principal y de distribución (m.c.a.).
- ✓ Hf_{sec} : pérdidas secundaria de carga a lo largo de la tubería (m.c.a.).
- ✓ P_{mult} : presión requerida a la entrada de la múltiple (m.c.a.).

3.12.1. Sobrepresión en válvulas:

En ocasiones, la bomba suministra una presión más elevada de lo que requiere la válvula para operar correctamente, causando daños en las mangueras de goteo y en la tubería de distribución cuando se sobrepasa la presión de operación de diseño de los elementos anteriores.

Es por lo anterior que se deben de colocar reguladores de presión en las válvulas para obtener la presión de trabajo del sistema y así evitar averías en las mangueras de goteo y en la tubería de distribución.

Para verificar la presión que llega a una válvula, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{val} = CDT - Hf_{acc} - Hf_{tub} - \Delta Z \dots \dots (48)$$

Donde:

- ✓ P_{val} : presión que llega a la válvula (m.c.a.).
- ✓ CDT: carga dinámica de la bomba (m.c.a.).
- ✓ Hf_{acc} : pérdida de carga que ocurren en los elementos de filtrado del sistema (m.c.a.).
- ✓ Hf_{tub} : pérdida de carga que ocurre a lo largo de la tubería principal (m.c.a.).
- ✓ ΔZ : diferencia de altura entre el punto de bombeo y la válvula (m).

3.13. Programas informáticos

3.13.1. Surfer 10:

Surfer 10 es un programa de mapeo que interpola datos de latitud, longitud y altura irregularmente espaciados en una malla uniforme. La malla se utiliza para producir diferentes tipos de mapas, incluyendo curvas de nivel, mapas de superficie en tres dimensiones y relieve de sombras (Golden Software, 2011).

Por medio de comando “Grid-Data” utilizando el algoritmo de interpolación conocido como “Kriging” da la posibilidad de introducir los parámetros del variograma, un modelo especial de variación espacial de la autocorrección espacial, lo cual hace de este algoritmo semiprobabilístico uno de los más robustos a la hora de interpolar (Golden Software, 2011).

3.13.2. AutoCAD 2010:

AutoCAD es un programa de delineación y dibujo de detalles en dos dimensiones y de diseño en tres dimensiones utilizado por la mayoría de diseñadores y artistas en el mundo entero. (Autodesk , 2009).

El concepto de “Diseño Asistido por Computadora” (en inglés “Computer Aided Design” – “CAD”), representa el conjunto de aplicaciones informáticas que permiten a un diseñador definir el producto a fabricar (Autodesk , 2009).

Una parte del programa AutoCAD está orientado a la producción de planos, empleando para ellos los recursos tradicionales del dibujo, como color y grosor del líneas (Autodesk , 2009).

AutoCAD gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos) con la que se puede operar a través de una pantalla gráfica en las que se muestran éstas, llamado editor de dibujo. La interacción del usuario se realiza a través de comandos, de edición o dibujo, desde la línea de órdenes, a la que el programa está principalmente orientado (Autodesk , 2009).

AutoCAD procesa imágenes de tipo vectorial, aunque admite incorporar archivos de tipo fotográfico, donde se dibujan figuras básicas (líneas, arcos, rectángulos, textos, etc.), y mediante herramientas de edición se crean gráficos más complejos. El programa permite organizar los objetos por medio de capas o estratos, ordenando el dibujo en partes independientes con diferente color y grosor. El dibujo de objetos seriados se gestiona mediante el uso de bloques, posibilitando la definición y modificación única de múltiples objetos repetidos (Autodesk , 2009).

3.14. Almacenamiento de agua

El almacenamiento de agua en reservorios permite tener al productor, al productor agropecuario, un suministro de agua de calidad en el verano o durante sequías o veranillos que se presentan en la época de invierno (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2010).

La siguiente figura corresponde a la laguna que abastece el riego en la finca Santa Marta



Figura 9. Laguna de la finca Santa Marta

Si un reservorio es de forma irregular, se debe de hacer el levantamiento topográfico (con estación total, GPS) para posteriormente estimar el volumen (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2010).

Para estimar los días que un reservorio natural puede abastecer el riego en una parcela, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Días de riego} = \frac{\text{Volumen útil de la laguna}}{\text{Caudal extraído}} \dots \dots (49)$$

Donde:

- ✓ Volumen útil de la laguna: m^3
- ✓ Caudal extraído: $\text{m}^3/\text{día}$

Para estimar el volumen de agua que se pierde por evaporación, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2010), recomienda el uso de la siguiente ecuación:

$$\text{Vol}_{evap} = 10 \cdot S \cdot E \dots \dots (50)$$

Donde:

- ✓ Vol_{evap} : volumen evaporado del reservorio (m^3)

- ✓ S: área del espejo de agua (ha)
- ✓ E: evaporación (mm/mes)

3.15. Balance hídrico

El balance hídrico mensual de un proyecto resulta de gran interés práctico (elaboración de calendarios agrícolas). Su cálculo se realiza a partir de los valores de la evapotranspiración corregida, haciendo intervenir además la precipitación media mensual (Villón, 2004).

IV. METODOLOGÍA

4.1. Levantamiento del área.

Se realizó el levantamiento de la finca Santa Marta haciendo uso de un GPS marca Garmin, modelo GPSmap 76CSx de alta precisión, mediante la toma de puntos siguiendo los contornos del terreno, con una separación entre cada punto es de aproximadamente 10 m.

Posteriormente, mediante la utilización del programa Surfer 10 y de los datos obtenidos del levantamiento topográfico, se elaboró el mapa de curvas a nivel de la finca, así como el de cada uno de las 7 parcelas que componen la propiedad.

4.2. Determinación de áreas y distancias.

Se realizó por medio de los programas informáticos Surfer 10 y AutoCAD 2010, descrito en los apartados 3.13.1. y 3.13.2. respectivamente.

4.3. Toma de muestras de suelo.

Se realizó una calicata en el centro de la finca, de una profundidad de 0,50 m, para la extracción de muestras de suelo para su posterior análisis en el laboratorio.

4.4. Determinación de la textura del suelo.

Se utilizó el método de Bouyoucos, descrito en el apartado 3.2.4.

4.5. Determinación de la Capacidad de campo y el Punto de marchitez permanente.

Ante la imposibilidad de extraer muestras correctamente del sitio del proyecto porque al momento de realizar las extracciones de las mismas se desmoronaban, se opta por utilizar el método basado de la textura para calcular los puntos de Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente del suelo.

Se calculó el valor de la Capacidad de campo por medio de la ecuación 8 (página 23).

El valor del Punto de marchitez permanente se determinó utilizando la ecuación 9 (página 23).

4.6. Determinación del peso específico aparente del suelo.

El peso específico aparente se calculó por medio de la ecuación 3 (página 18).

4.7. Determinación de la evapotranspiración potencial de la zona de estudio.

Se realizó por medio de método de Thornthwaite, descrito en el apartado 3.3.3.

4.8. Balance hídrico.

Se elaboró un balance hídrico para determinar los meses donde se requiere aplicar riego al cultivo, según el método descrito en la página 65.

4.9. Cálculo del PAR.

Se utilizó la figura 7, que obedece al método propuesto por Keller y Karmelli (página 56).

4.10. Diseño agronómico.

Para el cálculo de la lámina neta, se utilizó la ecuación 41 (página 57).

Posteriormente, se calculó la evapotranspiración en riego por goteo utilizando las ecuaciones 43 y 44 (página 57).

Para calcular la frecuencia de riego, se utilizó la ecuación 42 (página 57).

El ajuste de la lámina neta se realizó por medio de la ecuación 45 (página 58).

El valor de la lámina bruta, se obtuvo por medio de la ecuación 19 (página 28).

Para el cálculo del tiempo de riego se utilizó la ecuación 46 (página 58).

4.11. Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo.

Se utilizó el principio de la Regla del 20%, en donde las pérdidas admisibles se calcularon por medio de la ecuación 25 ó 26, según sea el caso (página 39).

La pérdida de carga que se presenta en la línea crítica, se determinó por medio de la ecuación 23 (página 37).

El cálculo del coeficiente de Christiansen para el lateral de goteo y la tubería de distribución o múltiple, se realizó por medio de las ecuaciones 21 ó 22, según sea el caso (página 37).

Para determinar el diámetro adecuado para las tuberías múltiples se utilizó la ecuación 31 (página 41).

Al igual que la línea crítica, la pérdida de carga que presenta la tubería de distribución se determinó por medio de la ecuación 23 (página 37).

4.12. Cálculo de la presión en los laterales de goteo y tuberías de distribución.

- **Laterales de goteo:**

Para el cálculo de la presión de entrada en el lateral de goteo, se utilizó la ecuación 28 (página 39).

- **Tubería de distribución.**

Para el cálculo de la presión de entrada en la tubería múltiple, se empleó la ecuación 29 (página 40).

4.13. Presión distal.

Se utilizó la ecuación 30 (página 40).

4.14. Cálculo del diámetro de la tubería principal.

Se utilizó la ecuación 32 para determinar el diámetro adecuado para la tubería principal (página 41).

4.15. Velocidad dentro de las tuberías.

Se utilizó la ecuación 33 (página 42).

4.16. Pérdidas secundarias del sistema.

Las pérdidas secundarias se obtuvieron por medio de la ecuación 24 (página 38).

4.17. Carga dinámica total.

Se empleó la ecuación 47 (página 61).

Para verificar la presión en cada válvula del sistema se empleó la ecuación 48 (página 62).

4.15. Días de riego de la laguna

Se utilizó la ecuación 50 para determinar el volumen de agua que se pierde por evaporación en la laguna (página 65).

Para estimar las pérdidas que ocurren por infiltración, se colocó una regla de madera dentro de la laguna y se midió al día siguiente a la misma hora en que se colocó la regla, para estimar lo que la laguna pierde por infiltración en 24 horas.

Los días de riego de la laguna se determinaron por medio de la ecuación 49 (página 65).

4.18. Diseño de la caseta de bombeo.

Se diseñó una caseta de bombeo para albergar a los elementos más costosos del proyecto.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Mapa de curvas de nivel

A continuación se presenta el mapa de curvas a nivel que se obtuvo mediante el programa Surfer 10 de la finca Santa Marta, con curvas a cada metro.

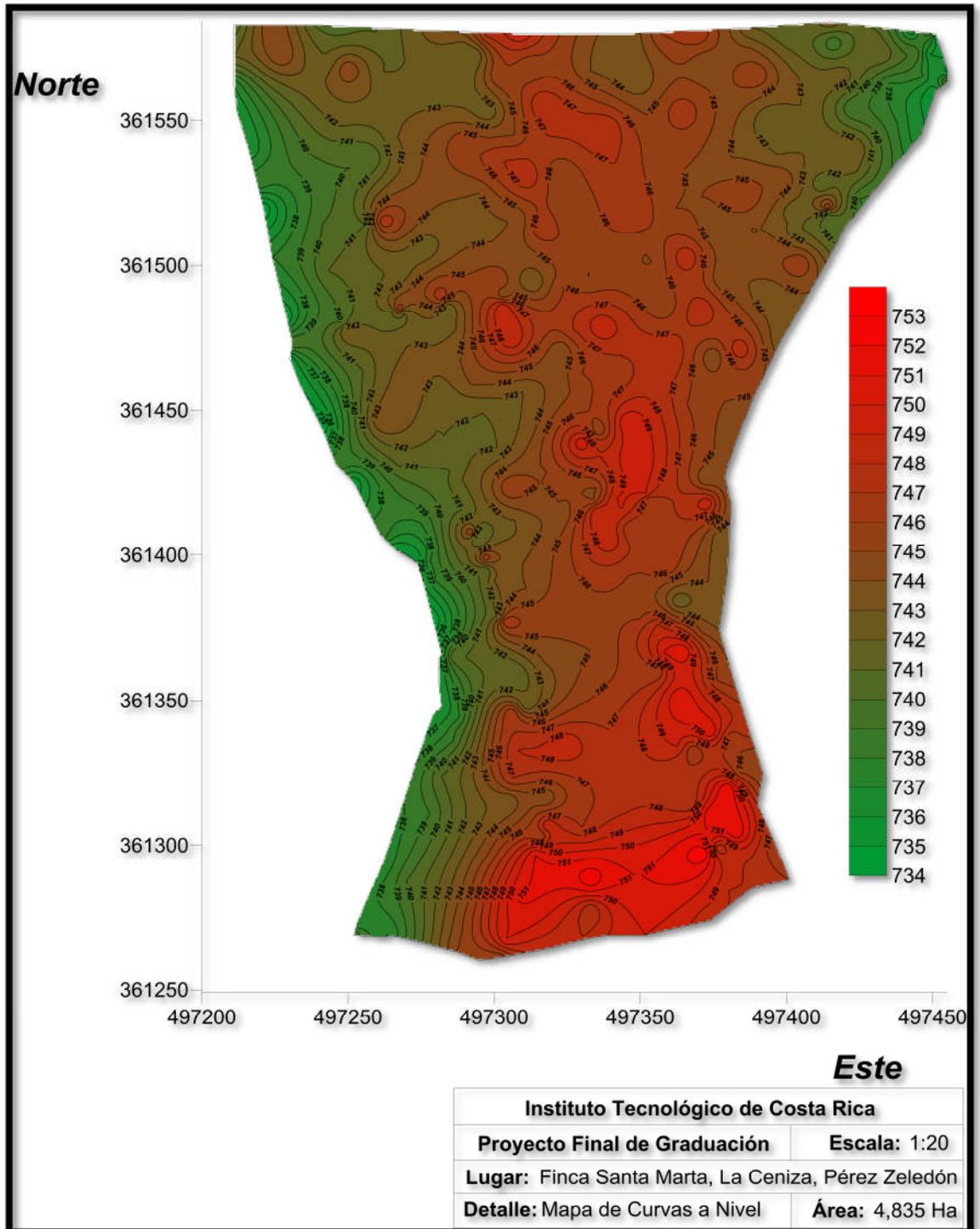


Figura 10. Mapa de curvas a nivel de la finca Santa Marta

5.2. Textura del suelo

Se obtuvieron los siguientes datos del método de Bouyoucos, como se visualizan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Resultados del Método de Bouyoucos

Tiempo	Temperatura (°C)	Lectura del hidrómetro	Lectura corregida del hidrómetro
40 s	24,00	14,50	15,88
2 h	23,50	6,00	7,23

- **Porcentaje del material en suspensión:**

Empleando la ecuación 4, se obtiene:

$$\text{Material en suspensión} = 39,70\%$$

- **Porcentaje de arenas:**

Aplicando ecuación 5, se obtiene:

$$\text{Porcentaje de arena} = 60,30\%$$

- **Porcentaje de arcillas:**

Empleando la ecuación 6, se obtiene:

$$\text{Porcentaje de arcilla} = 18,07\%$$

- **Porcentaje de limos:**

Utilizando la ecuación 7, se obtiene:

$$\text{Porcentaje de limo} = 21,63\%$$

Así, el suelo de la finca Santa Marta está conformado por un 60,30% de arena, un 18,07% de arcilla y un 21,62% de limo.

Luego, haciendo uso del triángulo textural (figura 6), se determinó que el suelo de la finca Santa Marta presenta una textura franco-arenosa.

5.3. Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente del suelo

Para determinar los puntos de Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente, se utilizaron las ecuaciones 8 y 9.

Utilizando la ecuación 8, se obtiene:

$$CC = 20,74\%$$

Empleando la ecuación 9, se obtiene:

$$PMP = 11,32\%$$

Según los datos anteriores, la Capacidad de campo del suelo se encuentra en un 20,74% y el Punto de marchitez permanente se ubica en un 11,32%.

5.4. Peso específico aparente del suelo

Se obtuvieron los siguientes resultados de la prueba de laboratorio y aplicando la ecuación 3, se obtienen los siguientes datos que se muestran a continuación:

Tabla 10. Resultados por muestra

Muestra	Volumen del recipiente (cm ³)	Peso del suelo seco (g)	Peso específico aparente del suelo (g/cm ³)
1	100,98	290,92	1,45
2	153,11	377,10	1,48
3	148,00	341,16	1,47

Como los valores son semejantes para las tres muestras, se va obtener un promedio de ellas, para utilizar el dato resultante en la ecuación 41.

$$Promedio = 1,47 \text{ g/cm}^3$$

Por lo tanto, el valor a utilizar en la ecuación 41 es de 1,47 g/cm³.

5.5. Evapotranspiración potencial

En el anexo 17 se muestran las temperaturas medias del año 2012 que se utilizaron para realizar el cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite.

La Tabla 11 muestra los valores del Índice de calor mensual (i), obtenidos por medio de la ecuación 11:

Tabla 11. Índice de calor (i) para cada mes

Mes	Índice de calor (i)
Enero	10,39
Febrero	10,44
Marzo	10,61
Abril	10,22
Mayo	10,27
Junio	10,24
Julio	10,13
Agosto	9,96
Setiembre	9,94
Octubre	9,70
Noviembre	9,92
Diciembre	9,97

La Tabla 12 muestra los valores de la evapotranspiración potencial sin corregir ($ETO_{s.c.}$), obtenidos por medio de la ecuación 13:

Tabla 12. Valores de Evapotranspiración potencial sin corregir

Mes	ETO_{s,c} (mm/mes)
Enero	97,21
Febrero	98,11
Marzo	100,90
Abril	94,37
Mayo	95,10
Junio	94,68
Julio	92,88
Agosto	90,07
Setiembre	89,71
Octubre	85,77
Noviembre	89,31
Diciembre	90,16

La Tabla 13 muestra los valores de la Tabla 11 corregidos por medio de la ecuación 15:

Tabla 13. Valores de la Evapotranspiración potencial corregidos

Mes	ETO (mm/mes)
Enero	97,11
Febrero	90,04
Marzo	104,26
Abril	96,73
Mayo	103,19
Junio	103,55
Julio	100,77
Agosto	96,16
Setiembre	90,46
Octubre	87,16
Noviembre	86,34
Diciembre	89,28

La Tabla 14 muestra los valores de la evapotranspiración real (Etr), según el coeficiente kc para la fase del ciclo vegetativo en que se encuentra el cultivo de la caña de azúcar, obtenidos por medio de la ecuación 10:

Tabla 14. Valores de Evapotranspiración real (Etr)

Mes	Coeficiente Kc	Etr (mm/día)
Enero	0,4	1,25
Febrero	0,4	1,24
Marzo	0,7	2,35
Abril	0,7	2,36
Mayo	0,7	2,33
Junio	1	3,45
Julio	1	3,25
Agosto	1	3,10
Setiembre	0,75	2,26
Octubre	0,75	2,11
Noviembre	0,5	1,44
Diciembre	0,4	1,15

La tabla 15, muestra el balance hídrico realizado para la zona de la Ceniza para el año 2012:

Tabla 15. Balance hídrico para el año 2012

	Ene	Feb	Mar	Abr	Ma	Jun	Jul	Ag	Set	Oct	Nov	Dic	Total
T prom mensual (°C)	23,5	23,5	23,8	23,2	23,3	23,2	23,1	22,8	22,8	22,4	22,8	22,8	-
Índice calor (i)	10,4	10,4	10,6	10,2	10,3	10,2	10,1	10,0	9,9	9,7	9,9	10,0	-
ETP (mm)	97,2	98,1	100,9	94,4	95,1	94,7	92,9	90,1	89,7	85,8	89,3	90,2	1118,3
ETP corregida (mm)	97,1	90,0	104,3	96,7	103,2	103,5	100,8	96,2	90,5	87,2	86,3	89,3	-
Precipitación (mm)	2,8	4	5,6	120,4	323,6	233,8	143,8	252,8	261,8	481,4	225,6	109,2	2164,8
Variación de la reserva (mm)	0	0	0	23,7	31,7	0	0	0	0	0	0	19,9	-
Reserva de agua disponible (mm)	0	0	0	23,7	55,4	55,4	55,4	55,4	55,4	55,4	55,4	31,1	-
ET efectiva (mm)	2,8	4	5,6	96,7	103,2	103,5	100,8	96,2	90,5	87,2	86,3	89,3	-
Excedente (mm)	-	-	-	-	188,7	130,3	43,0	156,6	171,3	394,2	139,3	-	-
Déficit hídrico mensual (mm)	94,3	86,0	98,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los valores de las filas Índice de calor, ETP y ETP corregida se obtuvieron por medio del método de Thornthwaite y se observan en las Tablas 11, 12 y 13 respectivamente.

La fila de Variación de la reserva, hace referencia los cambios de humedad que se dan en el suelo, cuando existen aportes y almacenamiento de agua en el suelo o en lo contrario, extracción y pérdida de esa humedad.

En la fila de Reserva de agua disponible, indica la capacidad de agua que existe en el suelo, que está en función del tipo de suelo y de la profundidad radicular. El valor de 55,4 mm indica el valor máximo de agua que se puede almacenar el suelo en este caso y se calculó por medio de la ecuación 17.

La fila de Excedente, indica el agua que habido caído por precipitación queda como sobrante, luego de proporcionar la cantidad necesaria para la evapotranspiración y para completar la reserva de agua en el suelo.

La fila de Déficit hídrico mensual, indica la cantidad de agua que falta para cumplir con la evapotranspiración, debido al agotamiento de las reservas del suelo, por la escasez de lluvias.

Como se observa en la Tabla 15, los meses que presentan déficit hídrico son Enero, Febrero y Marzo, por lo tanto son esos meses donde se debe de aplicar riego al cultivo para suplir el agua que requiere el cultivo para su adecuado crecimiento.

Además, el valor a utilizar en la ecuación 43 es de 2,35 mm/día (Tabla 14), ya que es el valor más alto que existe para la época de verano, los valores superiores a este valor (Abril, Junio, Julio y Agosto) se descartan porque para la zona de La Ceniza la precipitación suple los requerimientos de agua para el cultivo.

5.6. Diseño agronómico

Se va a utilizar el en los laterales de riego, el gotero marca Netafim, modelo16010, con un espaciamiento entre laterales de 1,50 m y entre goteros de 0,50 m. Ver el anexo 16 para observar en detalle las características técnicas del gotero. Esta cinta de goteo es autocompensada.

Se elige esta cinta, ya que la finca es de una topografía irregular.

- **Cálculo del PAR:**

Se utilizó la figura 7, con los siguientes datos:

- ✓ Caudal del gotero: 1,00 l/h
- ✓ Textura del suelo: franco arenoso (medio)
- ✓ Espaciamiento entre goteros: 0,50 m
- ✓ Espaciamiento entre laterales: 1,50 m

Según los datos anteriores, el PAR que se obtiene de un 47%.

- **Lámina neta:**

Para el cálculo de la lámina neta se tienen los datos:

- ✓ Capacidad de campo: 20,74%
- ✓ Punto de marchitez permanente: 11,32%
- ✓ Peso específico aparente del suelo: 1,47 g/cm³
- ✓ Profundidad radicular a regar: 400 mm (Subirós, página 4)
- ✓ Agotamiento permitido: se va a utilizar un agotamiento del 30 % (Conejo, página 60)
- ✓ PAR: 47%

Empleando la ecuación 41 con los datos anteriores, se obtiene:

$$Ln = 7,81 \text{ mm}$$

- **Cálculo de la Etrg:**

Aplicando la ecuación 44, se obtiene:

$$k_1 = 0,57$$

Luego, usando el dato anterior en la ecuación 43, se obtiene:

$$Etrg = 1,34 \text{ mm/día}$$

Por lo tanto, la evapotranspiración real para goteo es de 1,34 mm/día para la comunidad de La Ceniza.

- **Cálculo de la frecuencia de riego (FR):**

Empleando la ecuación 42, se obtiene:

$$FR = 5 \text{ días}$$

Por lo tanto, la frecuencia de riego es de 5 días para cada uno de los lotes de la finca Santa Marta

- **Corrección de la lámina neta:**

Aplicando la ecuación 45, se obtiene:

$$Ln = 6,70 \text{ mm}$$

Por lo tanto, la lámina neta a aplicar es de 6,70 mm.

- **Calculo de la lámina bruta:**

Para el cálculo de la lámina bruta se tienen los siguientes datos:

- ✓ Lámina neta: 6,70 mm
- ✓ Eficiencia de aplicación: 90% (Antúnez, Mora, & Felmer, página 29)

Empleando la ecuación 19 con los datos anteriores, se obtiene:

$$Lb = 7,45 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el valor de la lámina bruta a aplicar es de 7,45 mm.

- **Cálculo del tiempo de riego:**

Empleando la ecuación 46, se obtiene:

$$TR = 5 \text{ horas y } 35 \text{ minutos}$$

Por lo tanto, el tiempo de riego a utilizar es de 5 horas y 35 minutos para cada lote de la finca Santa Marta.

Se disponen de 12 horas diarias de riego al día, según la información suministrada por la Gerencia Agrícola de CoopeAgri.

La finca Santa Marta está dividida en 7 lotes, a continuación se muestra una figura que muestra la distribución de la finca Santa Marta.

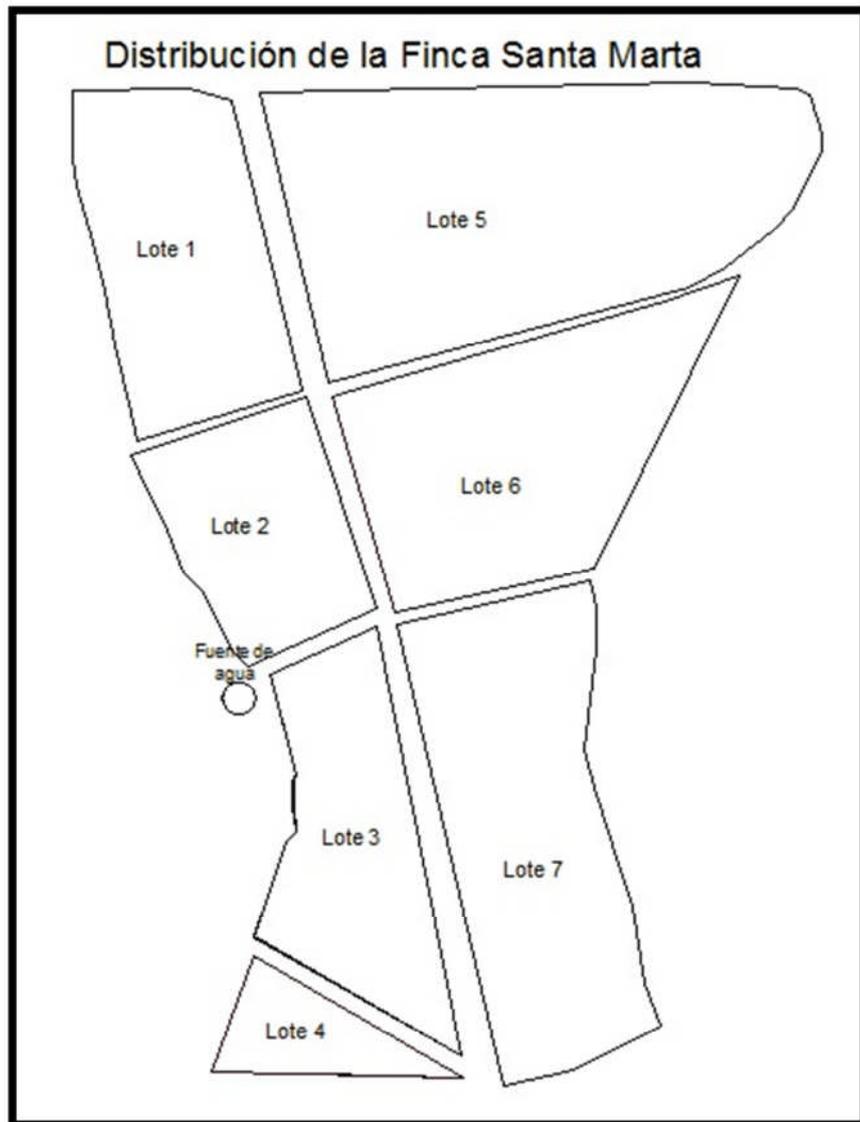


Figura 11. Distribución de la finca Santa Marta

El área efectiva de siembra de la propiedad es de 4,14 ha.

Por lo tanto, para este sistema se tienen los siguientes datos:

- ✓ Lámina neta: 6,70 mm
- ✓ Lámina bruta a aplicar: 7,45 mm
- ✓ Frecuencia de riego: 5 días
- ✓ Tiempo de riego por lote: 5 horas y 35 minutos.
- ✓ Horas de riego disponibles al día: 12 horas.

5.7. Diámetros para las tuberías múltiples o de distribución

Ver los anexos del 1 al 7 para observar en detalle las curvas a nivel en cada uno de los lotes.

- **Lote 1:**

La línea crítica en este lote presenta los siguientes datos:

- ✓ Longitud de la línea: 100, 71 m
- ✓ ΔZ : 3,00 m (sube)
- ✓ Caudal de la línea: 0,20 m³/h
- ✓ Factor F: 0,3616

La pérdida admisible en este caso viene dado por la ecuación 26, en donde la presión de operación del gotero es de 20 m.c.a.

El ΔZ es negativo ya que la línea crítica sube, así aplicando la ecuación 26, se obtiene:

$$P_{adm} = 1 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida admisible es de 1 m.c.a. distribuido entre la línea de goteo y la tubería múltiple, ya que el lote 1 funciona como un sistema sólido.

La pérdida de carga en la línea crítica viene dada por la ecuación 23, utilizando los datos de la línea crítica, se obtiene:

$$Hf = 0,55 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la línea crítica tiene una pérdida de carga de 0,55 m.c.a.

La pérdida de presión para el diseño de la tubería de múltiple es de:

$$Hf_{mul} = 0,45 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, para el diseño de la tubería múltiple, la pérdida de carga por fricción no debe de sobrepasar los 0,45 m.c.a.

Para el lote 1, se tienen los siguientes datos para el cálculo del diámetro de la múltiple:

- ✓ Caudal de la tubería múltiple: 7,00 m³/h.
- ✓ Longitud de la tubería múltiple: 56,50 m.
- ✓ Pérdida de carga admisible: 0,45 m.c.a.
- ✓ 37 salidas presenta la tubería múltiple.
- ✓ La primera salida se encuentra a una distancia igual al espaciamiento utilizado para ellos a partir de la múltiple.

Factor F para las 37 salidas en la múltiple:

Utilizando la ecuación 21, se obtiene:

$$F = 0,3759$$

Por lo tanto, el valor del factor de Christiansen para el lote 1 es de 0,3759.

Diámetro de la múltiple:

Para determinar el diámetro de la tubería múltiple se utiliza la ecuación 31.

Aplicando la ecuación 31, se obtiene:

$$D = 49,78 \text{ mm}$$

Comercialmente el diámetro más cercano al valor obtenido por la ecuación 31 es de 38 mm en tubería de PVC SDR 41, con un diámetro interno de 45,90 mm.

Para calcular la pérdida carga en la tubería múltiple, con el diámetro comercial, se emplea la ecuación 23, así:

$$H_f = 0,66 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida de carga en la tubería múltiple es de 0,66 m.c.a.

La pérdida de carga en la tubería de distribución sobrepasa el valor máximo de pérdida admisible, pero lo anterior no afecta aplicación de agua en el lote porque las líneas de goteo son autocompensadas.

- **Lote 2:**

La línea crítica en este lote presenta los siguientes datos:

- ✓ Longitud de la línea: 73,64 m
- ✓ ΔZ : 2,50 m (sube)
- ✓ Caudal de la línea: 0,15 m³/h
- ✓ Factor F: 0,3614

Aplicando la ecuación 26, se obtiene:

$$P_{adm} = 1,50 \text{ m. c. a.}$$

Como el lote 2 se comporta como un sistema sólido, la pérdida de carga admisible se distribuye entre la línea de goteo y la tubería de distribución.

La pérdida de carga en la línea crítica se obtiene aplicando la ecuación 23, así se obtiene:

$$H_f = 0,22 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida de carga en la línea crítica es de 0,22 m.c.a.

La pérdida de carga para el diseño de la tubería de múltiple es de:

$$H_{f_{mul}} = 1,28 \text{ m. c. a.}$$

De esta forma, para el diseño de la tubería múltiple, las pérdidas de carga no deben de sobrepasar los 1,28 m.c.a.

Entonces, para el lote 2 se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal de la tubería múltiple: 4,80 m³/h.
- ✓ Longitud de la tubería múltiple: 52,00 m.
- ✓ Pérdida de carga admisible: 1,28 m.c.a.
- ✓ 34 salidas presenta la tubería múltiple.

Factor F para las 34 salidas en la múltiple:

Aplicando la ecuación 22, ya que la primera salida está ubicada cerca del inicio de la múltiple, se obtiene:

$$F = 0,3583$$

Así, el valor del factor F en este caso es de 0,3583.

Diámetro de la múltiple:

Empleando la ecuación 31, se obtiene:

$$D = 33,87 \text{ mm}$$

Comercialmente en tubería de PVC SDR 41, el menor diámetro comercial disponible es 31 mm con un diámetro interno de 39,80 mm.

Utilizando el anterior diámetro para la tubería de distribución y aplicando la ecuación 23, se obtiene:

$$H_f = 0,58 \text{ m. c. a.}$$

Así, la pérdida en la tubería de distribución es de 0,58 m.c.a, siendo ésta menor que la admisible, establecida por la Regla del 20% que es de 1,28 m.c.a.

• **Lote 3:**

Para el lote 3, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal de la tubería múltiple: 5,38 m³/h.
- ✓ Longitud de la tubería múltiple: 35,00 m.
- ✓ Pérdida de carga admisible: no existe
- ✓ 23 salidas presenta la tubería múltiple.

Como no existe una pérdida admisible en este caso, se hizo uso del método de Carga Unitaria para determinar el valor carga admisible para el diseño de la tubería múltiple, así se tiene un valor de pérdida de 0,80 m.c.a. para los 35 m de longitud de la tubería de distribución.

Al hablar de carga admisible nula, se refiere que al ejecutar la ecuación 26 el resultado que se obtiene es negativo.

Factor F para las 23 salidas en la múltiple:

Empleando la ecuación 21, se obtiene:

$$F = 0,3843$$

Así, el valor del factor F es de 0,3843.

Diámetro de la múltiple:

Utilizando la ecuación 31, se obtiene:

$$D = 36,44 \text{ mm}$$

Comercialmente en tubería de PVC SDR 41, el menor diámetro disponible es 31 mm, con un diámetro interno de 39,80 mm. Utilizando este diámetro para la tubería múltiple, las pérdidas por fricción se determinan mediante la utilización de la ecuación 23.

Empleando la ecuación 23, se obtiene:

$$H_f = 0,51 \text{ m. c. a.}$$

La pérdida en la tubería de distribución es de 0,51 m.c.a, siendo esta menor que la admisible, por lo tanto, la tubería múltiple cumple con el procedimiento de Carga Unitaria.

• **Lote 4:**

Este lote alimenta una parte del lote tres, por lo que los datos de la línea crítica son:

- ✓ Longitud de la línea: 33,38 m
- ✓ ΔZ : 0 (a nivel)
- ✓ Caudal de la línea: 0,07 m³/h
- ✓ Factor F: 0,3603

Aplicando la ecuación 25, se obtiene:

$$P_{adm} = 4 \text{ m. c. a.}$$

Como el diseño se basa en el principio del sistema sólido, la pérdida admisible de distribuye entre la línea de goteo y la tubería múltiple.

La pérdida de carga en la línea crítica se obtiene aplicando la ecuación 23, así se obtiene:

$$H_f = 0,02 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida de carga en la línea crítica es de 0,02 m.c.a.

La pérdida de carga para el diseño de la tubería de múltiple es de:

$$H_{f_{mul}} = 3,98 \text{ m. c. a.}$$

Para el lote 4, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal de la tubería múltiple: 3,16 m³/h.
- ✓ Longitud de la tubería múltiple: 71,50 m.
- ✓ Pérdida de carga admisible: 3,98 m.c.a.
- ✓ 48 salidas presenta la tubería múltiple.

Factor F para las 48 salidas en la múltiple:

Utilizando la ecuación 21, se obtiene:

$$F = 0,3728$$

Por lo tanto, el valor del coeficiente de Crhistiansen es de 0,3728.

Diámetro de la múltiple:

Aplicando la ecuación 31, se obtiene:

$$D = 10,25 \text{ mm}$$

Comercialmente en tubería de PVC SDR 41, el menor diámetro disponible es 31 mm, con un diámetro interno de 39,80 mm, Se va a utilizar el anterior diámetro para el diseño de la tubería de distribución.

Empleando la ecuación 23, se obtiene:

$$H_f = 0,38 \text{ m. c. a.}$$

Así, el valor de las pérdidas de carga por fricción a lo largo de la tubería múltiple es de 0,38 m.c.a., menor que el valor de pérdida determinado por la Regla del 20%.

- **Lote 5:**

Para el lote 5, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal de la tubería múltiple: 15,95 m³/h.
- ✓ Longitud de la tubería múltiple: 181,00 m.
- ✓ Pérdida de carga admisible: no hay.
- ✓ 120 salidas presenta la tubería múltiple.

Utilizando el método de Carga Unitaria, la pérdida por fricción es de 4,16 m.c.a. para el diseño de la tubería múltiple.

Factor F para las 120 salidas en la múltiple:

Empleando la ecuación 21, se obtiene:

$$F = 0,3665$$

Por lo tanto, el valor del factor de Christiansen en este caso es de 0,3665.

Diámetro de la múltiple:

Utilizando la ecuación 31, se obtiene:

$$D = 54,49 \text{ mm}$$

El diámetro comercial en PVC SDR 41 cercano al valor anterior, es el de 50 mm de diámetro nominal, con un diámetro interno de 57,38 mm.

Aplicando la ecuación 23 con el diámetro anterior, se obtiene:

$$H_f = 3,20 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida por fricción que ocurre en la tubería múltiple es de 3,20 m.c.a., por lo que se cumple con el criterio de Carga Unitaria.

- **Lote 6:**

La línea crítica en este lote presenta los siguientes datos:

- ✓ Longitud de la línea: 73,03 m
- ✓ ΔZ : 2,50 m (sube)
- ✓ Caudal de la línea: 0,15 m³/h
- ✓ Factor F: 0,3614

Aplicando la ecuación 26, se obtiene:

$$P_{adm} = 1,50 \text{ m. c. a.}$$

La pérdida admisible se distribuye entre la línea crítica y la tubería de distribución, ya que el diseño se basa en el principio del sistema sólido.

Aplicando la ecuación 23, se obtiene:

$$H_f = 0,22 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida de carga en la línea crítica es de 0,22 m.c.a.

La pérdida de carga para el diseño de la tubería de múltiple es la siguiente:

$$H_{f_{mul}} = 1,28 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, para el diseño de la tubería múltiple, la pérdida de carga no debe de sobrepasar los 1,28 m.c.a.

Entonces para el lote 6, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal de la tubería múltiple: 10,48 m³/h.
- ✓ Longitud de la tubería múltiple: 157,50 m.
- ✓ Pérdida de carga admisible en la múltiple: 1,28 m.c.a.
- ✓ 105 salidas presenta la tubería múltiple.

Factor F para las 105 salidas en la múltiple:

Empleando la ecuación 21, se obtiene:

$$F = 0,3671$$

Por lo tanto, el valor del factor de Christiansen es de 0,3665.

Diámetro de la múltiple:

Utilizando la ecuación 31, se obtiene:

$$D = 57,52 \text{ mm}$$

El diámetro comercial que coincide con la medida obtenida por medio de la ecuación 31 en tubería de PVC SDR 41 es el de 50 mm, con un diámetro interno de 57,38 mm.

Utilizando el diámetro anterior en la tubería múltiple y ejecutando la ecuación 23, se obtiene:

$$H_f = 1,28 \text{ m. c. a.}$$

El valor de pérdida de carga por fricción coincide con el valor admisible, establecido por la Regla del 20%.

- **Lote 7:**

Para el lote 7, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal de la tubería múltiple: 10,06 m³/h.
- ✓ Longitud de la tubería múltiple: 56,00 m.
- ✓ Pérdida de carga admisible: no hay.
- ✓ 37 salidas presenta la tubería múltiple.

Utilizando el método de Carga Unitaria para determinar la pérdida de carga para la tubería de distribución, se tiene una pérdida admisible de 1,29 m.c.a.

Factor F para las 37 salidas en la múltiple:

Aplicando la ecuación 21, ya que la primera salida está ubicada a 1,50 m del inicio de la múltiple, se obtiene:

$$F = 0,3759$$

Por lo tanto, el valor del factor de Crhistiansen es de 0,3759.

Diámetro de la múltiple:

Utilizando la ecuación 31, se obtiene:

$$D = 45,95 \text{ mm}$$

El diámetro comercial que coincide con la medida anterior en tubería de PVC SDR 41 es 38 mm, con un diámetro interno de 45,90 mm.

Aplicando la ecuación 23, se obtiene:

$$H_f = 1,28 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida de carga por fricción que ocurre en la tubería múltiple del lote 7 es de 1,28 m.c.a., siendo menor que la establecida por el procedimiento de Carga Unitaria.

La Tabla 16 muestra los diámetros nominales e internos de las tuberías de distribución a colocar en cada uno de los lotes de la finca Santa Marta:

Tabla 16. Diámetros de las tuberías de distribución

Lote	Diámetro nominal de la tubería (mm)	Diámetro interno de la tubería (mm)
1	38	45,90
2	31	39,80
3	31	39,80
4	31	39,80
5	50	57,38
6	50	57,38
7	38	45,90

Según la Tabla anterior, los diámetros a utilizar en las tuberías de distribución de los lotes de la finca Santa Marta se encuentran entre los 31 a 50 mm en tubería de PVC SDR 41.

5.8. Presión a la entrada del lateral y la múltiple.

Ver los anexos del 8 al 14 para observar en detalle las líneas de goteo en cada uno de los lotes de la finca Santa Marta.

Utilizando las ecuaciones 28 y 29 para el calcular de la presión de entrada en el lateral y la presión de entrada en las tuberías múltiples respectivamente, se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 17:

Tabla 17. Presión de entrada en los laterales y múltiples

Lote	ΔZ del lateral (m)	Presión de entrada en el lateral (m.c.a.)	ΔZ de la múltiple (m)	Presión de entrada en la múltiple (m.c.a.)
1	(+) 3	23,55	(-) 6	18,21
2	(+) 2,50	22,72	(+) 9	30,50
3	(+) 6,50	27,10	(+) 7	30,50
4	0	20	(+) 10	30,30
5	(+) 3,50	23,90	(-) 9	18,10
6	(+) 2,50	22,72	(-) 5	19
7	(+) 0,50	22,14	(-) 1	22,42

El signo positivo (+) significa que el lateral y la múltiple suben y el signo negativo (-) hace referencia a que la múltiple baja.

Ya que la presión máxima que soporta la manguera de goteo es de 30,50 m.c.a., la presión máxima de entrada en la tubería múltiple no debe de sobrepasar dicho valor.

5.9. Presión distal.

Para calcular la presión distal en cada uno de los lotes de la finca, se va a suponer que la línea crítica se ubica al final de la tubería de distribución.

La Tabla 18 muestra los valores de la presión distal en el lateral, obtenidos por medio de la ecuación 30:

Tabla 18. Presión distal en el lateral

Lote	Presión de entrada en la múltiple (m.c.a.)	Pérdidas por fricción en la múltiple (m.c.a.)	Pérdidas por fricción en el lateral (m.c.a.)	Presión distal (m.c.a)
1	18,21	0,66	0,55	17
2	30,50	0,61	0,22	29,67
3	30,50	0,51	0,77	29,22
4	30,38	0,38	0,02	29,98
5	18,10	3,20	0,11	14,80
6	19	1,28	0,22	17,50
7	22,42	1,28	1,64	19, 50

La Tabla 19 muestra el diferencial de presión que existe en los lotes en el que su diseño se basó en la Regla del 20%:

Tabla 19. Diferencial de presión

Lote	Pérdida admisible (m.c.a.)	Pérdida total (m.c.a.)
1	1	1,21
2	1,50	0,80
4	4	0,40
6	1,50	1,50

Como se visualiza en la Tabla anterior, con excepción del lote 1, los restantes lotes cumplen con la Regla del 20%

El lote 6 si logra el valor de pérdida admisible, obtenido por medio de la ecuación 26.

La Tabla 20 muestra la pérdida total de presión que existe en los lotes que se diseñaron con el procedimiento de Carga Unitaria.

Tabla 20. Pérdida de carga en el procedimiento de Carga Unitaria

Lote	Pérdida total (m.c.a.)
3	1,28
5	3,70
7	2,92

Como se visualiza en la Tabla anterior, el mayor valor de pérdida de carga se da en el lote 5, ya que es este el que tiene la mayor longitud de tubería de distribución.

5.10. Diámetro de la tubería principal.

Para determinar el diámetro de la tubería se utilizó el método de Carga Unitaria, utilizado anteriormente en aquellos lotes en los que la carga admisible era nula.

Para este caso, la longitud de la tubería principal es de 120 m, obtenido por medio del programa AutoCAD 2010 y el máximo caudal a transportar a través de ella es de 17 m³/h.

La tubería principal presenta las siguientes características:

- ✓ Un tramo de 47 m que transporta un caudal máximo de 17 m³/h.
- ✓ Un tramo de 73 m que transporta un caudal máximo de 16 m³/h.

Aplicando la ecuación 32 para el tramo de 47 m, se obtiene:

$$D = 68,60 \text{ mm}$$

Comercialmente en tubería de PVC SDR 41, el valor más cercano es el de 62 mm, que presenta un interno de 69,46 mm. Colocando el diámetro comercial en los 47 m de tubería principal, las pérdidas por fricción se calculan por medio de la ecuación 20.

Aplicando la ecuación 20, se obtiene:

$$H_f = 1,00 \text{ m. c. a.}$$

Aplicando la ecuación 32 para el tramo de 73 m, se obtiene:

$$D = 67,04 \text{ mm}$$

Comercialmente en tubería de PVC SDR 41, el valor más cercano es el de 62 mm, que presenta un diámetro interno de 69,46 mm. Colocando el diámetro comercial en los 73 m, las pérdidas de carga por fricción se determinan por medio de la ecuación 20.

Aplicando la ecuación 20, se obtiene:

$$H_f = 1,40 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida total de carga que ocurre a lo largo de la tubería principal es de 2,40 m.c.a.

- **Tubería de alimentación al lote 4:**

Esta tubería presenta los siguientes datos:

- ✓ Longitud: 88,32 m
- ✓ Caudal a transportar: 3,16 m³/h

En la tubería de distribución de este lote se colocó PVC SDR 41 de 31 mm, se colocará ese mismo diámetro comercial para la tubería de alimentación al lote 4.

Aplicando la ecuación 20, se obtiene:

$$H_f = 1,26 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la pérdida por fricción que ocurre en la tubería principal que alimenta al lote 4 es de 1,26 m.c.a.

La figura 12 muestra la ubicación de la tubería principal y de alimentación al lote 4 en la propiedad.

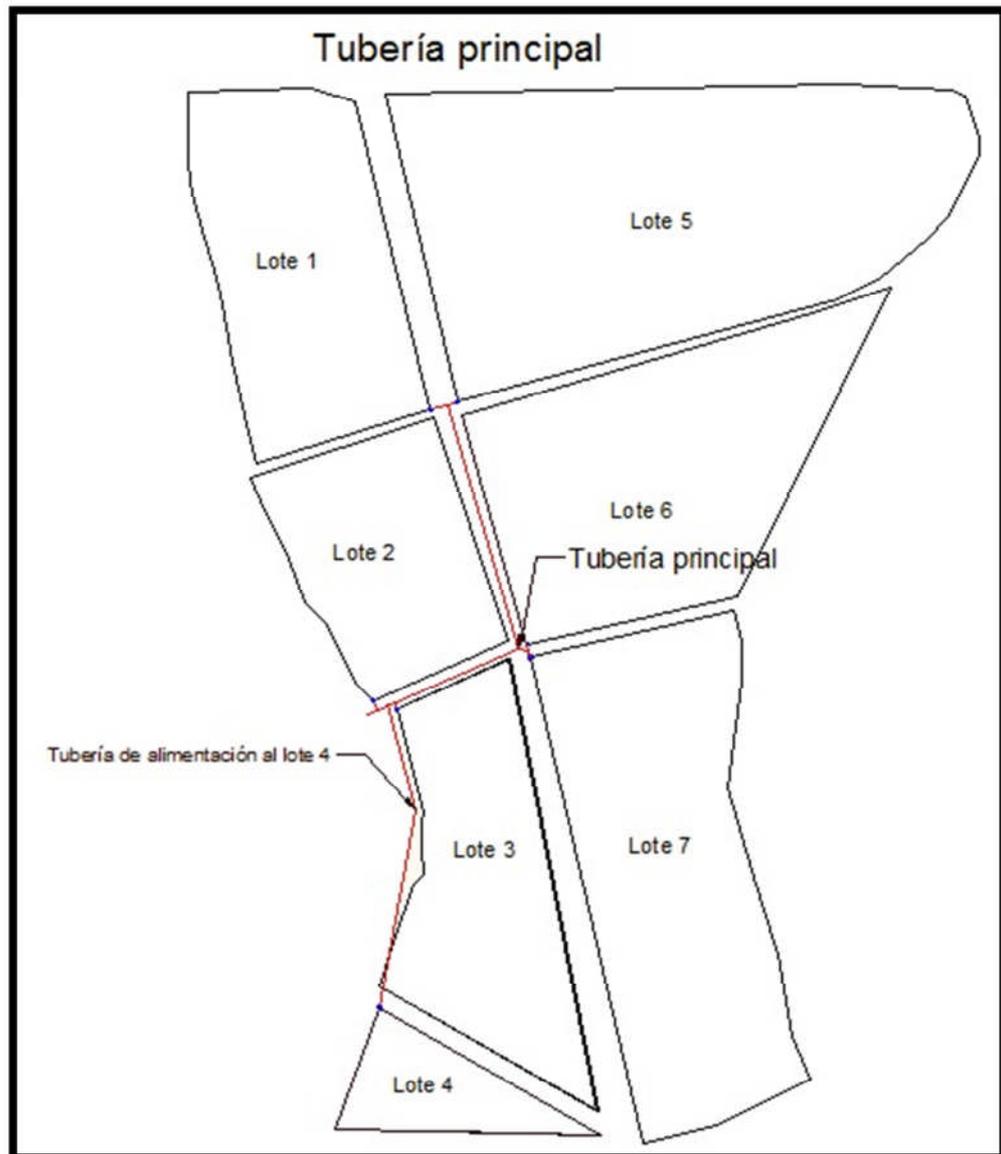


Figura 12. Ubicación de la tubería principal

A continuación, se muestra cómo se realiza la conexión de cada una de las válvulas con la tubería principal y los accesorios que se colocan en cada una de ellas, tal y como se muestra en la siguiente figura.

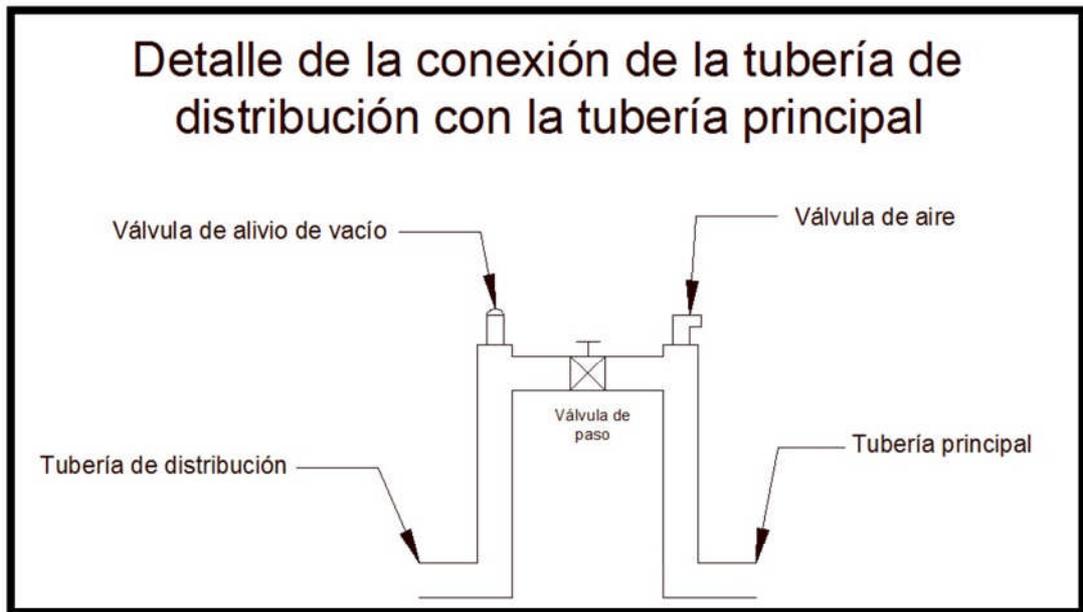


Figura 13. Conexión de la tubería de distribución con la tubería principal

La figura anterior recibe el nombre de Caballete de conexión.

Para realizar las conexiones de las líneas de goteo a la tubería de distribución se realiza de la siguiente manera: se realizan perforaciones de 16 mm en las tuberías múltiples, sobre esas perforaciones se adhieren adaptadores en los que se instalan mangueras de polietileno de 16 mm, al final de las mangueras se colocan dispositivos a los cuales se acoplan conectores en los que se coloca las mangueras de goteo.

La siguiente figura muestra los elementos necesarios para llevar a cabo el proceso antes descrito.

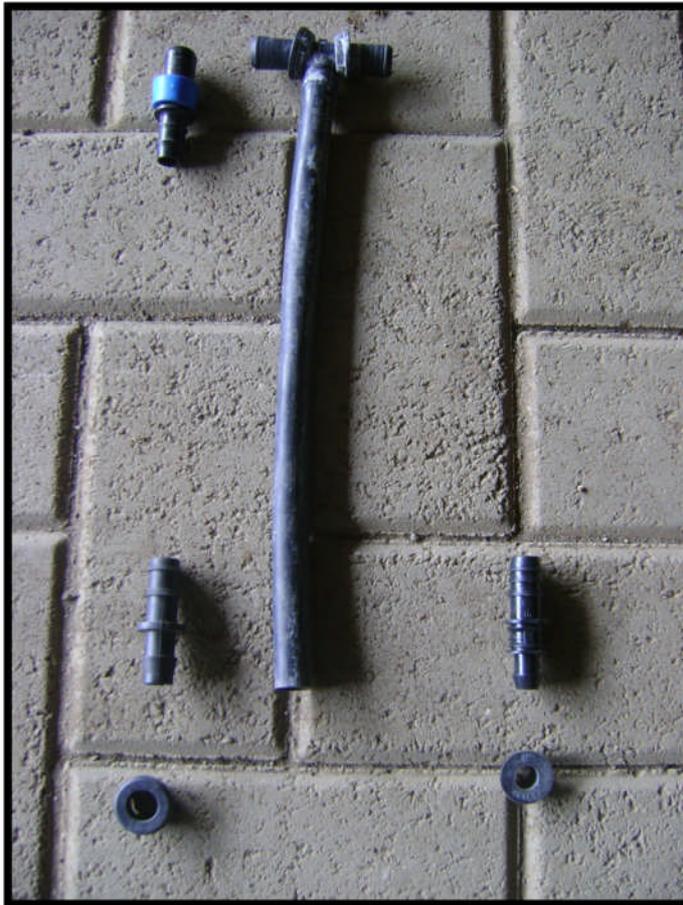


Figura 14. Accesorios para la conexión de las cintas de goteo a las tuberías múltiples

5.11. Velocidad dentro de las tuberías.

La Tabla 19 muestra los valores de velocidad dentro de las tuberías múltiples obtenidas por medio de la ecuación 34.

Tabla 21. Velocidad en las tuberías múltiples

Lote	Caudal de la tubería múltiple (m³/h)	Diámetro interno de la tubería (mm)	Velocidad (m/s)
1	7	45,90	1,18
2	4,80	39,80	1,07
3	5,38	39,80	1,20
4	3,16	39,80	0,71
5	15,95	57,38	1,72
6	10,48	57,38	1,13
7	10,06	45,90	1,70

Como se aprecia en la Tabla anterior, solo la tubería múltiple del lote 4 no cumple con el valor de velocidad permitida dentro de las tuberías, esto se debe a que el diámetro colocado en ese lote es el menor diámetro comercial que existe en PVC SDR 41.

- **Tubería principal:**

Para el tramo de 47 m, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal máximo de la tubería: 17 m³/h
- ✓ Diámetro de la tubería: 69,46 mm.

Utilizando la ecuación 33, se obtiene:

$$V = 1,24 \text{ m/s}$$

Para el tramo de 73 m, se tienen los siguientes datos:

- ✓ Caudal máximo de la tubería: 16 m³/h
- ✓ Diámetro de la tubería: 69,46 mm.

Utilizando la ecuación 33, se obtiene:

$$V = 1,17 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, en ambos tramos de la tubería, la velocidad se encuentra dentro de los límites establecidos de velocidad permitida dentro de las tuberías.

- **Tubería de alimentación al lote 4:**

La velocidad en ese tramo de tubería es el mismo que para la tubería múltiple del lote 4, ya que se colocó el mismo diámetro, por lo tanto, la velocidad en ese tramo de tubería es de 0,71 m/s.

Este dato anterior de velocidad se encuentra por debajo de los límites establecidos de velocidad permitida dentro de las tuberías.

5.12. Días de riego de la laguna.

El área de la laguna de la finca Santa Marta es de 10798 m².

El volumen de la laguna es de 37793 m³.

Para regar toda el área se requieren de 317,11 m³/día.

Utilizando la ecuación 50 para determinar el volumen de agua que se pierde por evaporación en un mes, se obtiene:

$$Vol_{evap} = 1048,92 m^3$$

Por lo tanto, el volumen de agua que se evapora en tres meses es de:

$$Vol_{evap} = 3146,78 m^3$$

Se estimó que la laguna pierde en promedio 10 mm diarios, lo que representa un volumen perdido de 9720 m³ en los 3 meses que se opera el sistema de riego en la finca Santa Marta.

Así, el volumen útil para riego, se obtiene de restar los valores del volumen de la laguna, las pérdidas por evaporación y el volumen de agua que se pierde por infiltración.

Por lo tanto el volumen útil para riego es de:

$$Volumen\ útil\ para\ riego = 24926,22 m^3$$

Empleando la ecuación 49, se obtiene:

$$Días\ de\ riego = 78\ días$$

Por lo tanto, la laguna de la finca Santa Marta provee de riego a la propiedad por 78 días.

5.13. Sistema de filtrado

El sistema del filtrado está compuesto por un filtro de grava y un filtro de anillos.

Para determinar la pérdida de carga para los elementos anteriores, se utilizará el turno 1 de operación del sistema, ya que es el que presenta la situación más crítica para obtener el valor de la carga dinámica de la bomba.

El filtro de grava seleccionado es marca Odis, modelo 4243, cuyo rango de operación está comprendido entre los 14 a los 28 m³/h.

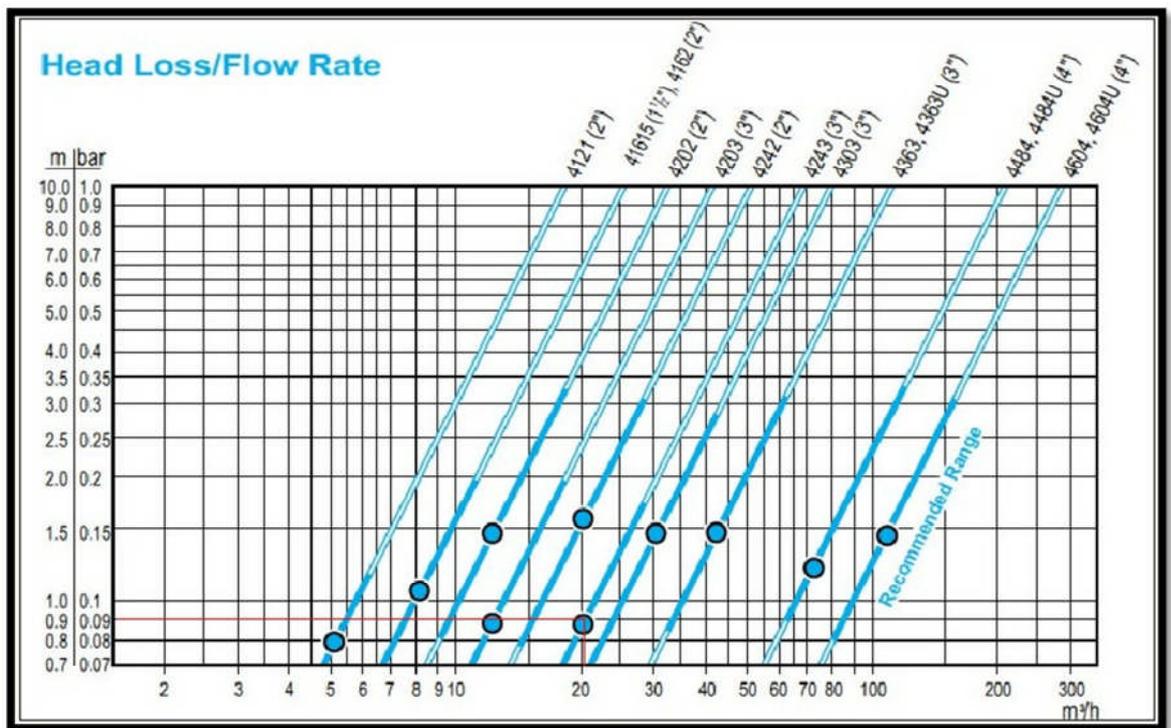


Figura 15. Pérdida de carga para el filtro de grava según el caudal

Según la figura anterior, el filtro presenta una pérdida de carga de 0,90 m.c.a. para el caudal de 20,22 m³/h.

El filtro de anillos seleccionado es marca Arkal, cuyo rango de operación está comprendido entre 10 a los 50 m³/h.

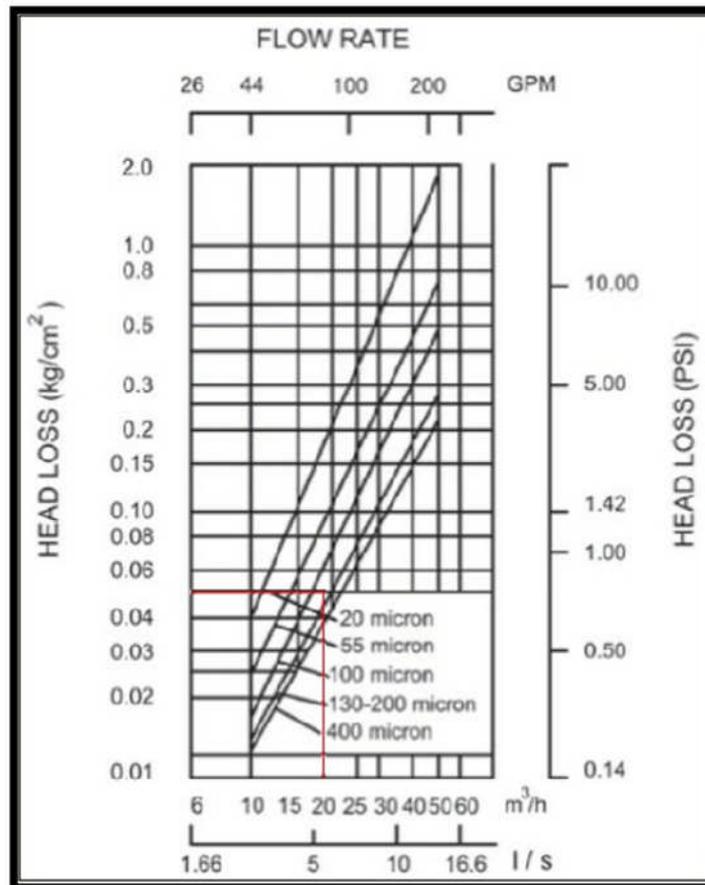


Figura 16. Pérdida de carga para el filtro de anillos

Como se aprecia en la figura anterior, el filtro presenta una pérdida de carga de 0,5 m.c.a. para el caudal de 20,22 m³/h.

5.14. Pérdidas secundarias

Para este apartado, las pérdidas secundarias se van a cuantificar para determinar la Carga dinámica de la bomba, lo que se calcularan para el tramo más crítico del sistema (lote 7).

Los accesorios presentan una pérdida de carga de 0,90 m.c.a. para el filtro de grava y de 0,50 m.c.a. para el filtro de anillos. Así las pérdidas por la conexión de los accesorios anteriores son de 1,40 m.c.a.

Así, se tiene que el tramo de tubería principal que conecta la lote 7 tiene una longitud de 51,92 m con una pérdida de carga de 1 m.c.a. y la presión de entrada en la tubería múltiple es de 22,42 m.c.a., así utilizando la ecuación 24, se obtiene:

$$Hf_{sec} = 2,55 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, las pérdidas secundarias para el tramo más crítico del sistema son de 2,55 m.c.a.

5.15. Carga dinámica total

Se tienen los siguientes datos para calcular este dato:

- ✓ ΔZ : 12 m
- ✓ Hf_{prin} : 1,37 m.c.a.
- ✓ Hf_{sec} : 2,55 m.c.a.
- ✓ P_A : 22,42 m.c.a.

Así, sustituyendo los datos anteriores en la ecuación 47, se tiene:

$$CDT = 38,34 \text{ m. c. a.}$$

Por lo tanto, la bomba requiere una carga de 38,34 m.c.a. para operar adecuadamente el sistema.

Como la finca Santa Marta carece de servicio eléctrico, la bomba debe de funcionar con combustible diesel, por solicitud de la Gerencia Agrícola de CoopeAgri.

Se encontró la siguiente motobomba, marca Lombardini, modelo M-820, con las siguientes características que se observan en la siguiente figura:

<p><u>CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS</u> CUERPO BOMBA: En fundición gris RODETE: Cerrado D. 200 mm en fundición gris CIERRE: SELLO MECÁNICO en Cerámica/Grafito</p> <p><u>FUNCIONAMIENTO</u> Fluido: Agua limpia Temperatura máxima del líquido: 90°C Presión máxima de ejercicio: 6 bars Altura máxima de aspiración: 5 m</p> <p><u>MOTOR DIESEL</u> Modelo: LOMBARDINI 4LD820 Tipo: Diesel monocilíndrico refrigerado por aire Cilindrada: 817 cm³ Potencia máxima NB: 16 CV Arranque: Eléctrico 12 V Filtro de aire: En baño de aceite Capacidad depósito combustible: 7,2 l. Capacidad cárter aceite: 2,6 l.</p> <p><u>MOTOBOMBA</u> Dimensiones (An x La x Al): 500 x 640 x 645 mm Peso: 138 Kg Batería recomendada arranque elec.: 55 Ah</p>
--

Figura 17. Características técnicas de la motobomba

Verificando en la curva de rendimiento de la motobomba (figura 18), a una presión de aproximadamente 41 m.c.a. y con el motor girando a una velocidad de 2600 rpm, el caudal que suministra la bomba es de 20 m³/h.

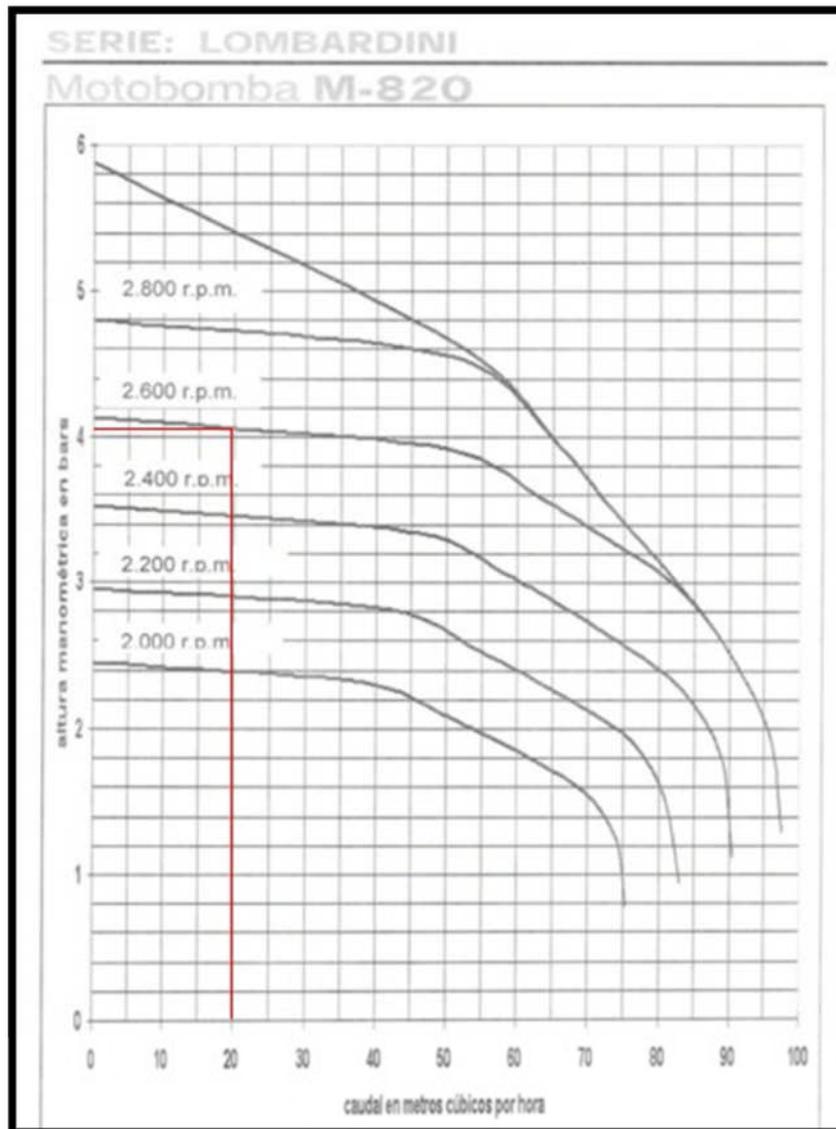


Figura 18. Curva de rendimiento de la motobomba

Verificación de presión en las válvulas:

La Tabla 22 presenta la presión que se requiere en la válvula y la presión que entrega a la bomba en cada una de las válvulas, obtenida por medio de la ecuación 48:

Tabla 22. Presión en las válvulas

Válvula	Presión requerida en la válvula (m.c.a.)	Presión suministrada por la bomba (m.c.a.)	Resultado
1	18,21	25,45	Presión adecuada
2	30,50	37,14	Sobrepresión
3	30,50	36,63	Sobrepresión
4	30,50	33,34	Sobrepresión
5	18,10	25,48	Presión adecuada
6	19	27,85	Presión adecuada
7	22,42	26,60	Presión adecuada

Como se aprecia en la Tabla 22, en las válvulas 2, 3 y 4 existe una sobrepresión.

Para evitar la colocación de reguladores de presión en las válvulas 2, 3 y 4, se va a operar la motobomba con una velocidad de giro de 2400 rpm para disminuir la presión suministrada. Con la velocidad anterior, la presión que proporciona la motobomba es de 35,30 m.c.a. según la información de la curva de rendimiento.

Por lo tanto, verificando nuevamente la presión en cada una de las válvulas del sistema, se obtiene la siguiente Tabla que se muestra a continuación:

Tabla 23. Presiones corregidas en las válvulas

Válvula	Presión requerida en la válvula (m.c.a.)	Presión suministrada por la bomba (m.c.a.)	Resultado
1	18,21	19,75	Presión adecuada
2	30,50	32,44	Sobrepresión
3	30,50	30,93	Presión adecuada
4	30,50	27,64	Presión adecuada
5	18,10	19,78	Presión adecuada
6	19	23,15	Presión adecuada
7	22,42	21,80	Presión adecuada

Por lo tanto, se debe de colocar un regulador de presión en la válvula 2 para evitar daños en la manguera de goteo, ya que la presión máxima de trabajo de la cinta de goteo es de 30,50 m.c.a (ver anexo 16).

5.16. Cuadro de operación del sistema

Como se observa en la figura 18, con un caudal de 20 m³/h se logra la Carga dinámica que la bomba necesita para operar el sistema adecuadamente, por lo tanto, haciendo la división del sistema que oscile en ese valor, se realiza la siguiente división de los turnos de riego que se muestran en la Tabla 24:

Tabla 24. Turnos de operación del sistema

Turno	Válvulas	Caudal (m ³ /h)
1	1,4 y 7	20,22
2	2 y 6	15,28
3	3 y 5	21,33

La figura 19 ilustra los turnos de riego en cada uno de los lotes según el color, el color verde hace referencia al turno de operación 1, el café al turno 2 y el azul al turno 3.

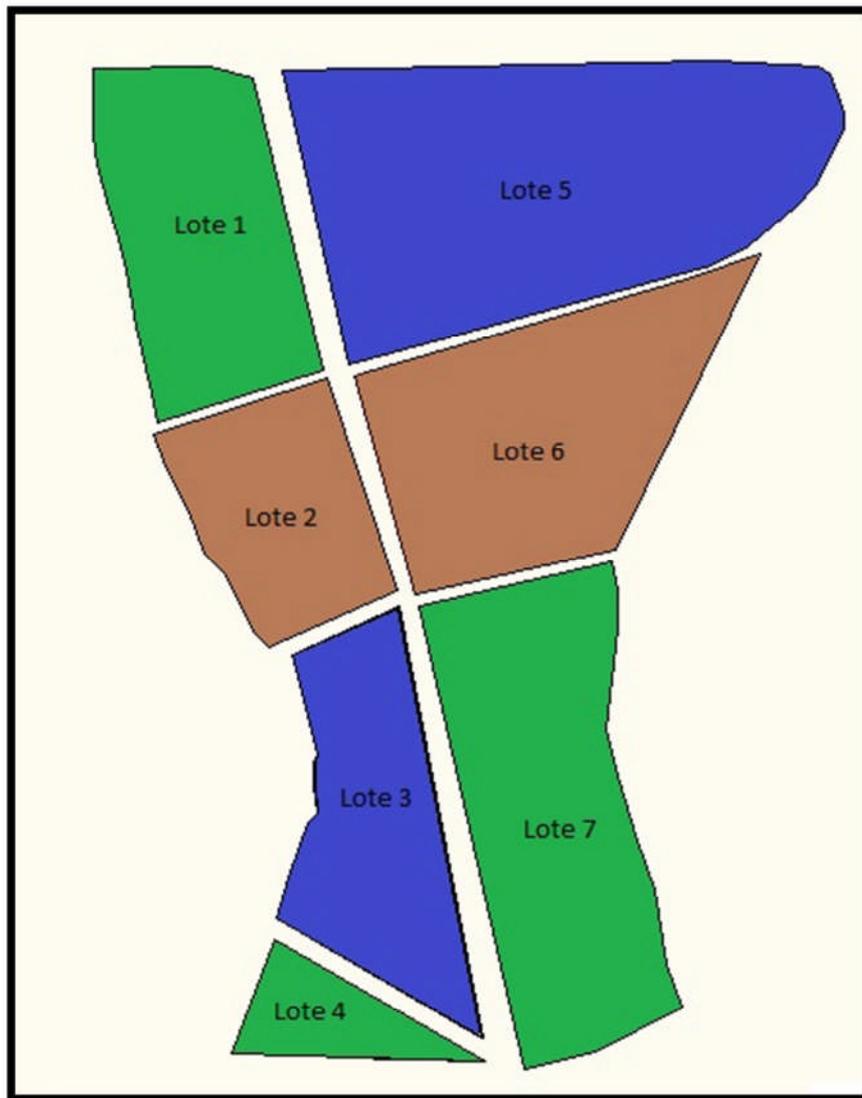


Figura 19. Turnos de operación del sistema de riego

5.17. Caseta de bombeo

A continuación se presenta la propuesta para la caseta de bombeo que alberga los diferentes componentes del sistema de riego, como se muestra en la siguiente figura:

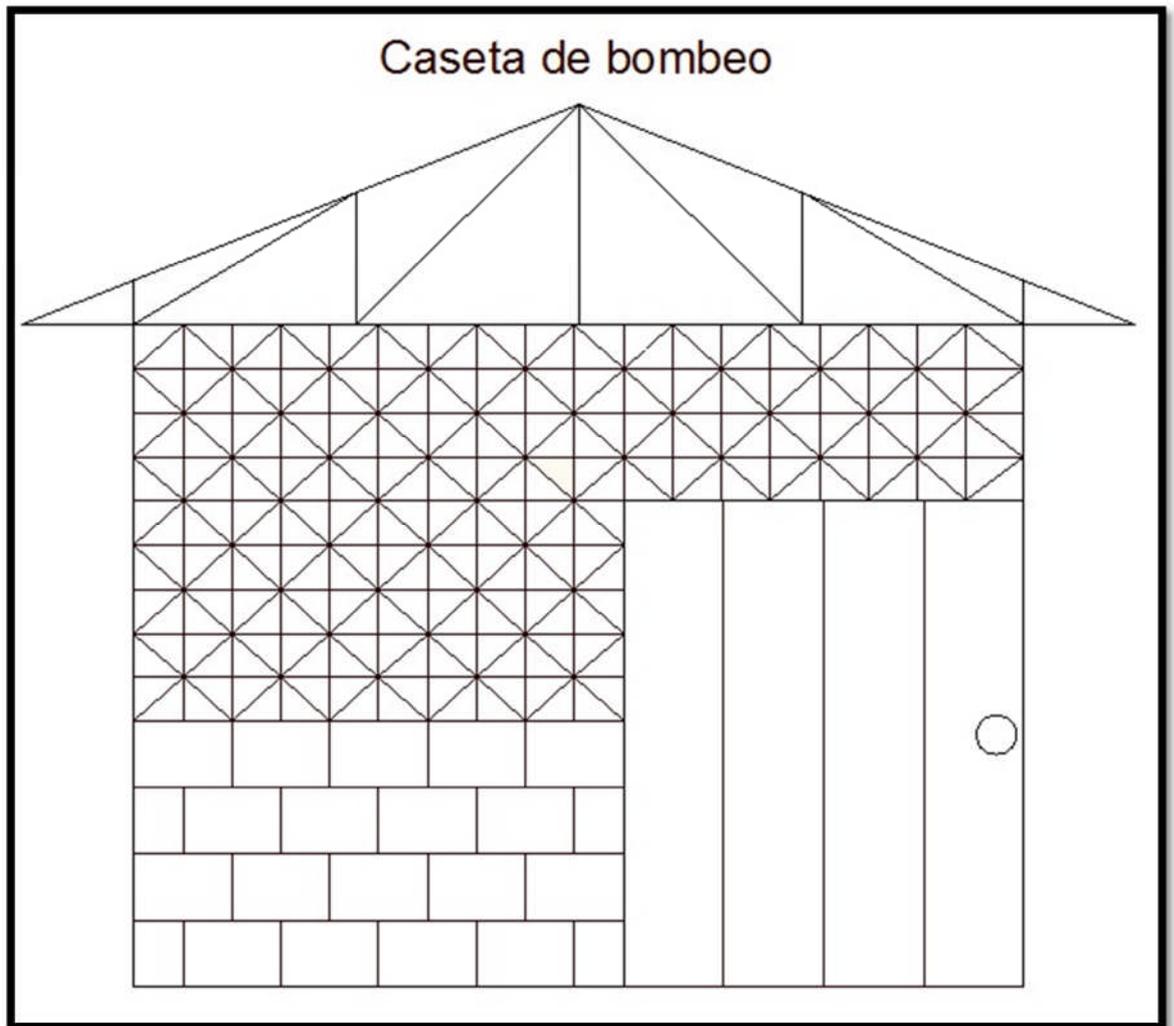


Figura 20. Propuesta para la Caseta de bombeo

La caseta presenta las siguientes dimensiones:

- ✓ Ancho: 4 m
- ✓ Alto: 3 m
- ✓ Largo: 3 m

La caseta de bombeo posee una losa de concreto de 20 cm de espesor, con una resistencia de 210 kg/cm^2 para soportar el peso de la motobomba, el filtro de grava y el tanque de fertilización.

- **Lista de materiales para la Caseta:**

La Tabla 25 muestra una lista de los materiales necesarios para construir la caseta de bombeo y el precio respectivo de cada material.

Tabla 25. Lista de materiales y precios para la Caseta de bombeo

Cantidad	Material	Precio unitario	Total
7	Láminas onduladas galvanizadas # 28 de 0,81 x 3,66 m	¢ 7.360	¢ 51.520
150	Bloques de concreto de 12 x 20 x 40 cm	¢ 370	¢ 55.500
14	m de Malla ciclón galvanizada #10	¢ 5.190	¢ 72.660
3	Perfiles en "c" galvanizados de 100 x 50 x 15mm	¢ 10.250	¢ 30.750
10	Tubos galvanizado redondo 50 mm	¢ 6.860	¢ 68.600
4	Varilla deformada # 3	¢ 1.595	¢ 6.380
18	Sacos de cemento 50 kg	¢ 5.710	¢ 102.780
2	m ³ de arena	¢ 10.000	¢ 20.000
2	m ³ de piedra	¢ 13.000	¢ 26.000
75	Tornillos para techo de 50 mm	¢ 25	¢ 1.875
	Mano de obra		¢ 150.000
	Total		¢ 586.065

Por lo tanto, el costo de construcción de la Caseta de bombeo es de ¢ 586.065,00

5.18. Lista de materiales

La Tabla 26 se presenta la lista de materiales y precios del proyecto de riego por goteo en la finca Santa Marta.

Tabla 26. Lista de materiales y precios para el sistema de riego

Cantidad	Material	Precio unitario	Total
27	Tubo PVC liso SDR41 31 mm	¢ 6.957	¢ 189.839
20	Tubo PVC liso SDR41 38 mm	¢ 7.664	¢ 153.280
58	Tubo PVC liso SDR41 50 mm	¢ 11.074	¢ 642.292
20	Tubo PVC liso SDR41 62 mm	¢ 20.973	¢ 419.460
4	T lisa PVC SCH 40 62 mm	¢ 7.333	¢ 29.332
5	T lisa PVC SCH 40 50 mm	¢ 2.254	¢ 11.270

Cantidad	Material	Precio unitario	Total
4	T lisa PVC SCH 40 38 mm	€ 1.677	€ 6.708
6	T lisa PVC SCH 40 31 mm	€ 1.304	€ 7.824
6	Codo liso 90° PVC SCH 40 31 mm	€ 1.096	€ 6.576
4	Codo liso 90° PVC SCH 40 38 mm	€ 1.295	€ 2.590
6	Codo liso 90° PVC SCH 40 50 mm	€ 1.991	€ 11.946
4	Codo liso 45° PVC SCH 40 50 mm	€ 1.737	€ 5.748
6	Reducciones lisas PVC SCH 80 62x50 mm	€ 6.178	€ 12.356
2	Reducciones lisas PVC SCH 80 50x38 mm	€ 3.593	€ 7.186
3	Reducciones lisas PVC SCH 80 50x31 mm	€ 3.558	€ 10.674
2	Adaptador macho C/R PVC SCH 40 50 mm	€ 1.141	€ 2.282
2	Adaptador macho C/R PVC SCH 40 38 mm	€ 760	€ 1.520
3	Adaptador macho C/R PVC SCH 40 31 mm	€ 643	€ 1.929
2	Tapón hembra C/R PVC SCH 40 50 mm	€ 842	€ 1.684
2	Tapón hembra C/R PVC SCH 40 38 mm	€ 1.789	€ 3.578
3	Tapón hembra C/R PVC SCH 40 31 mm	€ 594	€ 1.782
2	Válvula lisa bola PVC 50 mm	€ 2.253	€ 4.506
2	Válvulas lisas bola PVC 31 mm	€ 1.782	€ 3.564
3	Válvula lisa bola PVC 38 mm	€ 1.433	€ 4.299
2	Válvulas check 62 mm	€ 24.575	€ 49.150
1	Válvula alivio 62 mm	€ 15.150	€ 15.150
2	Válvulas de alivio de aire de 50 mm	€ 12.650	€ 25.300
2	Válvulas de alivio de aire de 38 mm	€ 3.535	€ 7.070
3	Válvulas de alivio de aire de 31 mm	€ 2.525	€ 7.575
2	Válvulas de alivio de vacío de 50 mm	€ 12.450	€ 24.900
2	Válvulas de alivio de vacío de 38 mm	€ 3.335	€ 6.670
3	Válvulas de alivio de vacío de 31 mm	€ 2.325	€ 6.975
1	Reguladores de presión de 31 mm	€ 3.765	€ 3.765
1	Manómetro	€ 10.400	€ 10.400
1	Motobomba diesel	€ 1.996.250	€ 1.996.250
1	Filtro de grava	€ 757.500	€ 757.500
1	Filtro de anillos	€ 168.650	€ 168.650
1	Tanque de fertilización 600 l	€ 282.255	€ 282.255
1	Bomba de inyección	€ 395.800	€ 395.800
13	Rollos de cinta de goteo autocompensadas de 2500 m	€ 189.375	€ 2.461.875
3	Rollos de manguera de polietileno de 200 m	€ 15.550	€ 46.500

Cantidad	Material	Precio unitario	Total
405	Conectores PE de 16x16 mm	∅ 150	∅ 60.750
18	T PE de derivación de 16 mm	∅ 180	∅ 3.240
425	Conectores de anillo	∅ 120	∅ 51.100
2	Galones de pegamento PVC	∅ 25.100	∅ 50.200
Instalación			∅ 1.800.000
Total			∅ 9.491.045

Por lo tanto, el costo de los materiales e instalación del sistema de riego por goteo es de ∅ 9.491.045,00

Así, sumando los totales de las Tablas 25 y 26, el costo del proyecto de riego es de ∅ 10.077.110,00

Asumiendo un 5% del valor total de la obra en imprevistos, dicho valor asciende a ∅ 503.855,50

Por lo tanto, el valor total de la obra asciende a ∅ 10.580.965,50

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. El suelo de la finca Santa Marta es de textura franco-arenosa.
2. El valor de la lámina de agua por aplicar al suelo es de 7,45 mm.
3. La frecuencia de riego a utilizar es de 5 días.
4. El tiempo de riego para cada uno de los 7 lotes que conforman la finca Santa Marta es de 5 horas y 35 minutos.
5. Se disponen de 12 horas diarias de riego al día.
6. Los diámetros de las tuberías de distribución se encuentran entre los 31 a 50 mm en PVC SDR 41.
7. El diámetro de la tubería principal es de 62 mm en PVC SDR 41.
8. Al existir una pérdida admisible en los lotes 1, 2, 4 y 6, el diseño de la tubería de distribución se basa en la Regla de 20%.
9. El lote 1 no satisface la Regla del 20%
10. Los lotes 3, 5 y 7 no existe un valor de pérdida de carga admisible, por lo que el diseño de la tubería de distribución se basa en el procedimiento de Carga Unitaria.
11. Con excepción de la tubería de alimentación y distribución del lote 4, las demás tuberías cumplen con los valores de velocidad permitida dentro de ellas.
12. La laguna de la finca Santa Marta abastece el riego por 78 días.
13. Con la motobomba otorgando una presión de 35,30 m.c.a., el sistema trabaja adecuadamente.
14. El costo total del proyecto asciende a ¢ 10.580.965,50

Recomendaciones:

1. La utilización de mangueras de goteo autocompensada asegura una distribución uniforme del agua a lo largo del lateral, lo que garantiza que la planta que se ubica a inicio como y la final de la cinta de goteo, se le aplica la misma cantidad de agua.
2. Sepultar la tubería principal a una profundidad de 0,70 m para evitar daños por el paso de la maquinaria, ya que la capa de suelo que se ubica sobre la tubería, protege a la misma de que ésta se rompa por el peso de la misma.
3. Sepultar la tubería de distribución de cada uno de los lotes a una profundidad de 0,50 m para evitar daños durante las labores de mecanización del terreno, ya que algunos implementos agrícolas alcanzan profundidades de trabajo de 0,40 m (rastras pesadas y el arado de cinceles principalmente).
4. Al operar la motobomba a una velocidad de giro de 2400 rpm se evita la sobrepresión en las válvulas del sistema de riego por goteo, con la excepción del lote 2, debido a que esta es la que se ubica más cerca de la descarga de la bomba.

VII. BIBLIOGRAFÍA

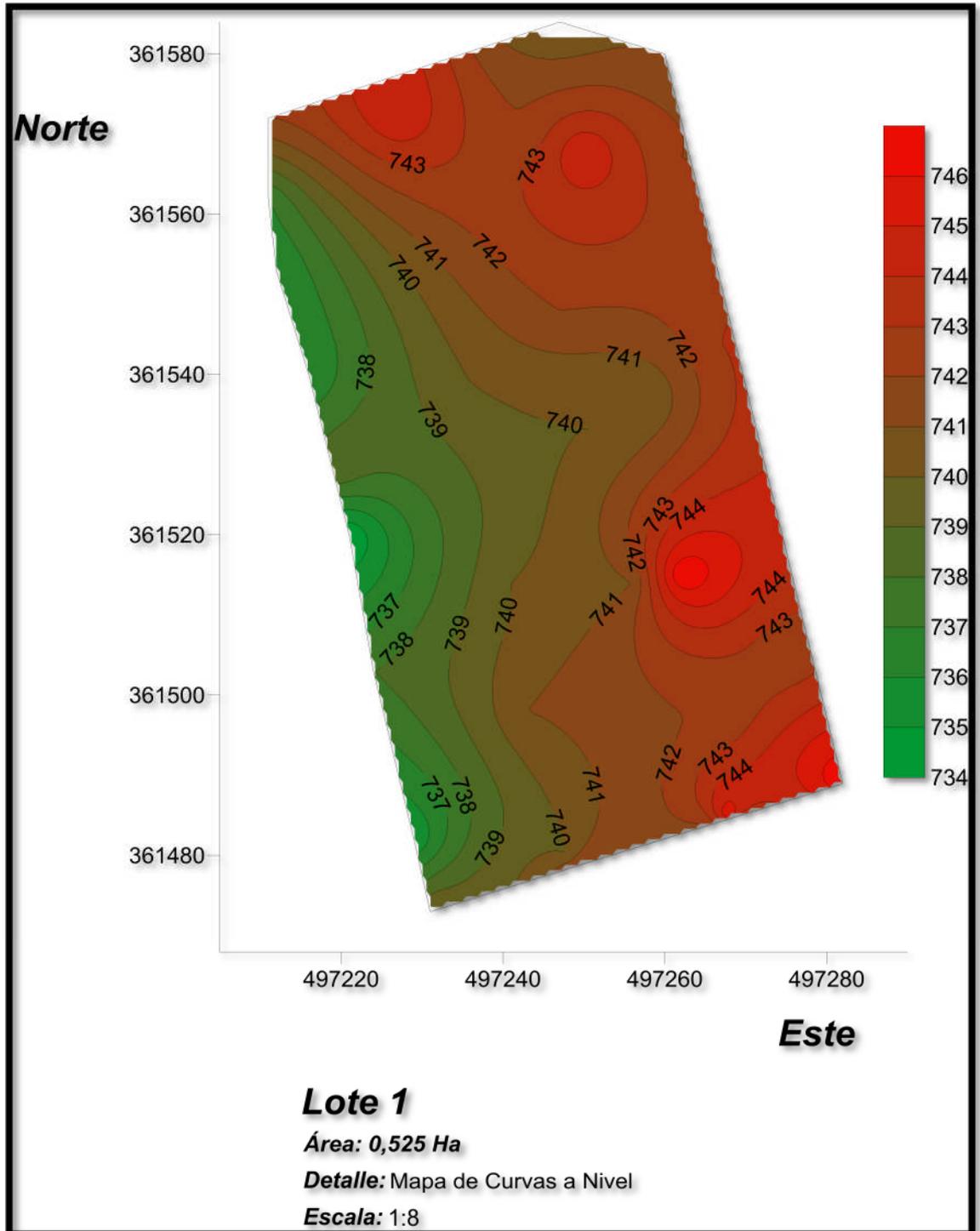
1. Antúnez, A., Mora, D., & Felmer, S. (2010). Eficiencia de los sistemas de riego por goteo en el secano. *INIA Tierra adentro*, 4.
2. Autodesk . (2009). *AutoCAD 2010, Manual de usuario*.
3. Chávarri, E. (2004). *Hidrología Aplicada* . Lima.
4. Chavarría, A. (2012). *Manual de Laboratorio de Edafología*. Cartago.
5. Conejo, Ó. (20 de Abril de 2013). Riego por goteo en caña de Azúcar. (A. Gamboa, Entrevistador)
6. Golden Software. (2011). *Surfer 10, Manual de Usuario*.
7. Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). *Caña de azúcar MAG*. Recuperado el 15 de Febrero de 2013, de La Caña de Azúcar: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/tec-cana.pdf>
8. Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2010). *Manual de especificaciones técnicas básicas para la elaboración de estructuras de captación de agua de lluvia (scall) en el sector agropecuario de Costa Rica y recomendaciones para su utilización*. San José.
9. Moya, J. A. (2009). *Riego Localizado y Fertirrigación*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
10. Murillo, J. P., Valverde, W., & Navarro, O. (2010). *Guía para el Manejo Integral de la Caña de Azúcar*. San Isidro: Agrícola, CoopeAgri.
11. Pizarro, F. (1990). *Riegos Localizados de Alta Frecuencia: Goteo, Microaspersión y Exudación*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

12. Rodrigo, J., Hernández, J. M., Pérez, A., & González, J. F. (1992). *Riego Localizado*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
13. Subirós, F. (2000). *El Cultivo de la Caña de Azúcar*. San José: EUNED.
14. Tarjuelo, J. M. (2005). *El Riego por Aspersión y su Tecnología*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
15. Villalobos, M. (2008). *Fundamentos de Riego*. Cartago: Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico (CDMB).
16. Villalobos, M. (2011). *Material de clase: Riego por Aspersión*. Cartago.
17. Villalobos, M. (2011). *Material de clase: Riego por Goteo*. Cartago.
18. Villón, M. (2004). *Hidrología*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

VIII. ANEXOS

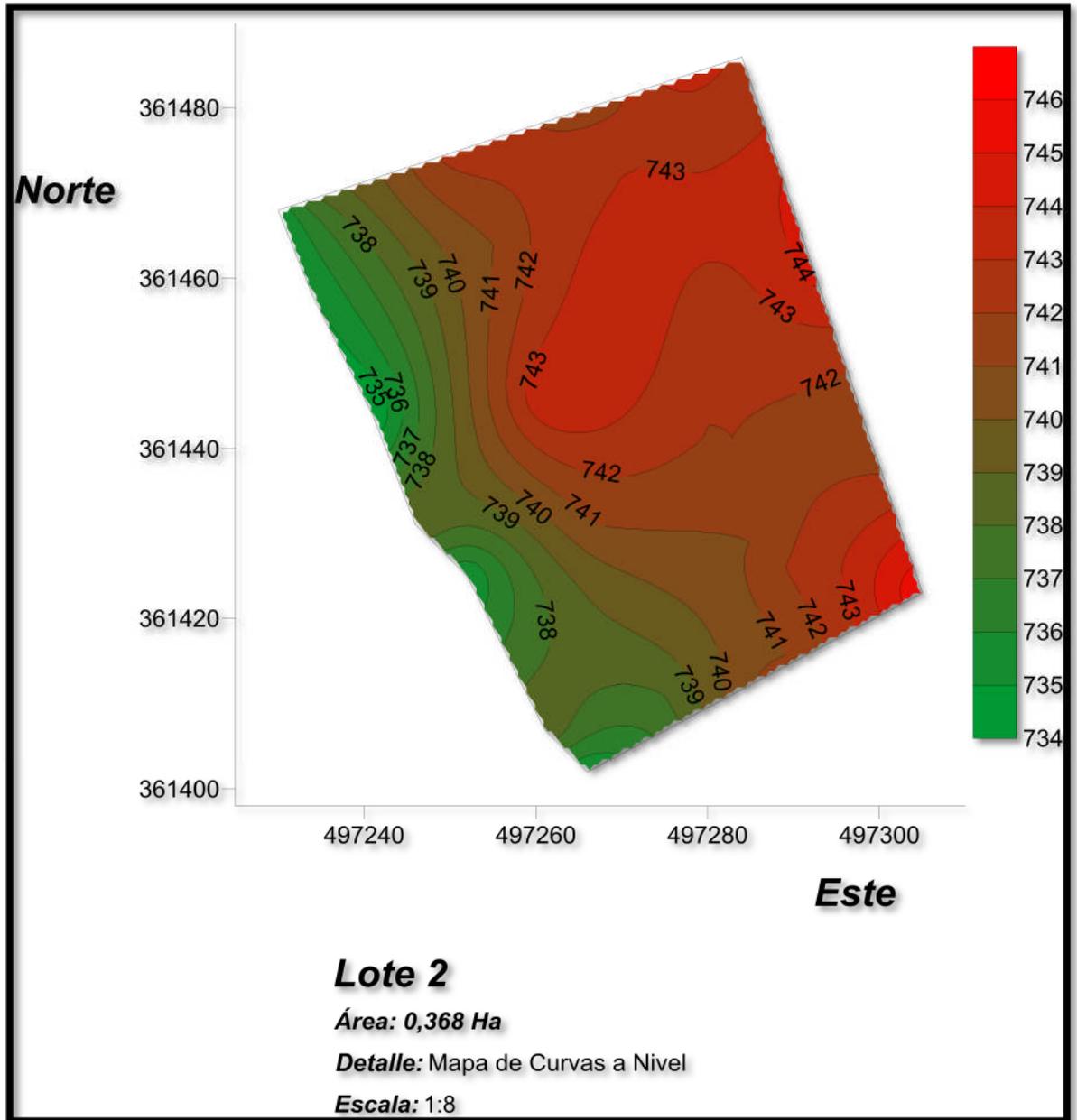
Anexo 1:

Curvas a nivel, lote 1:



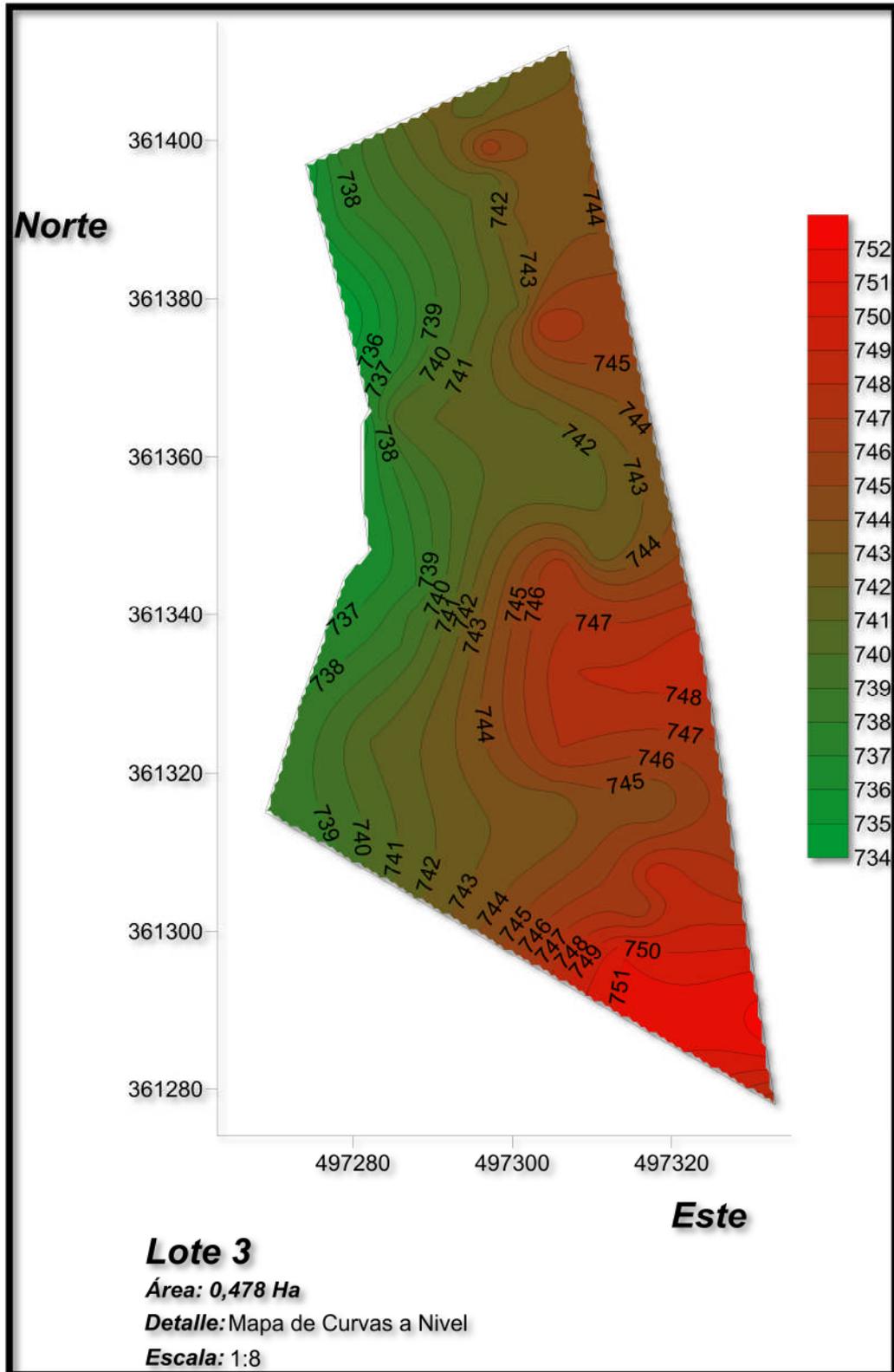
Anexo 2:

Curvas a nivel, lote 2:



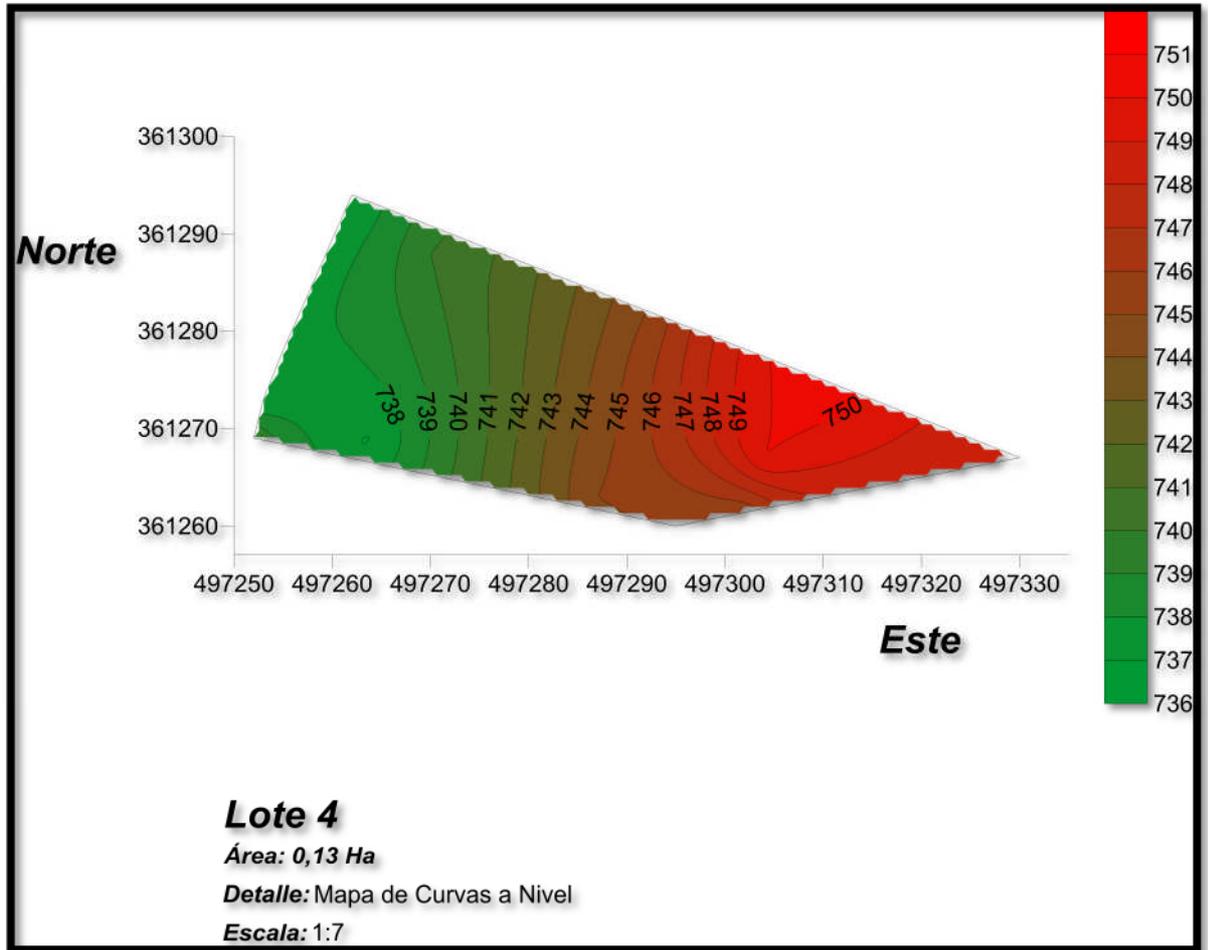
Anexo 3:

Curvas a nivel, lote 3:



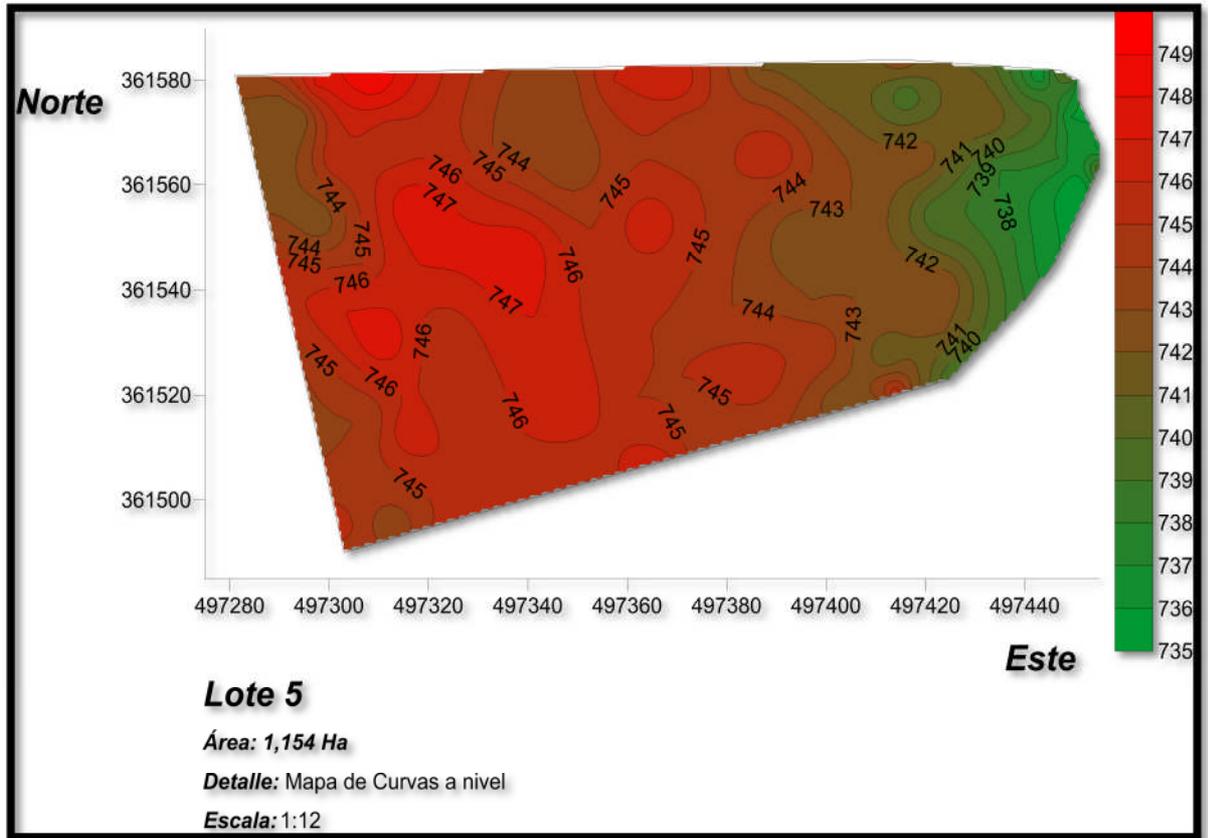
Anexo 4:

Curvas a nivel, lote 4:



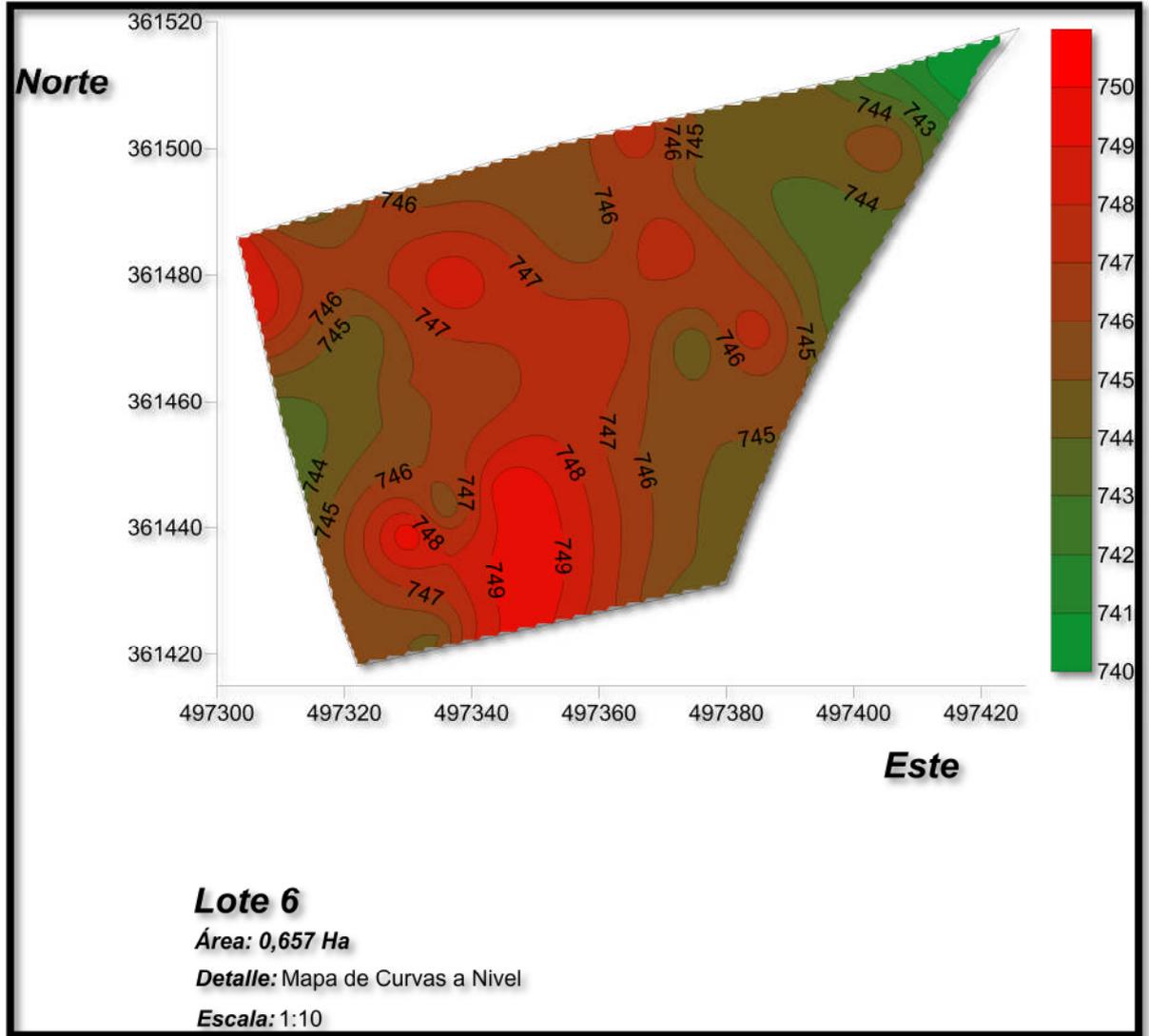
Anexo 5:

Curvas a nivel, lote 5:



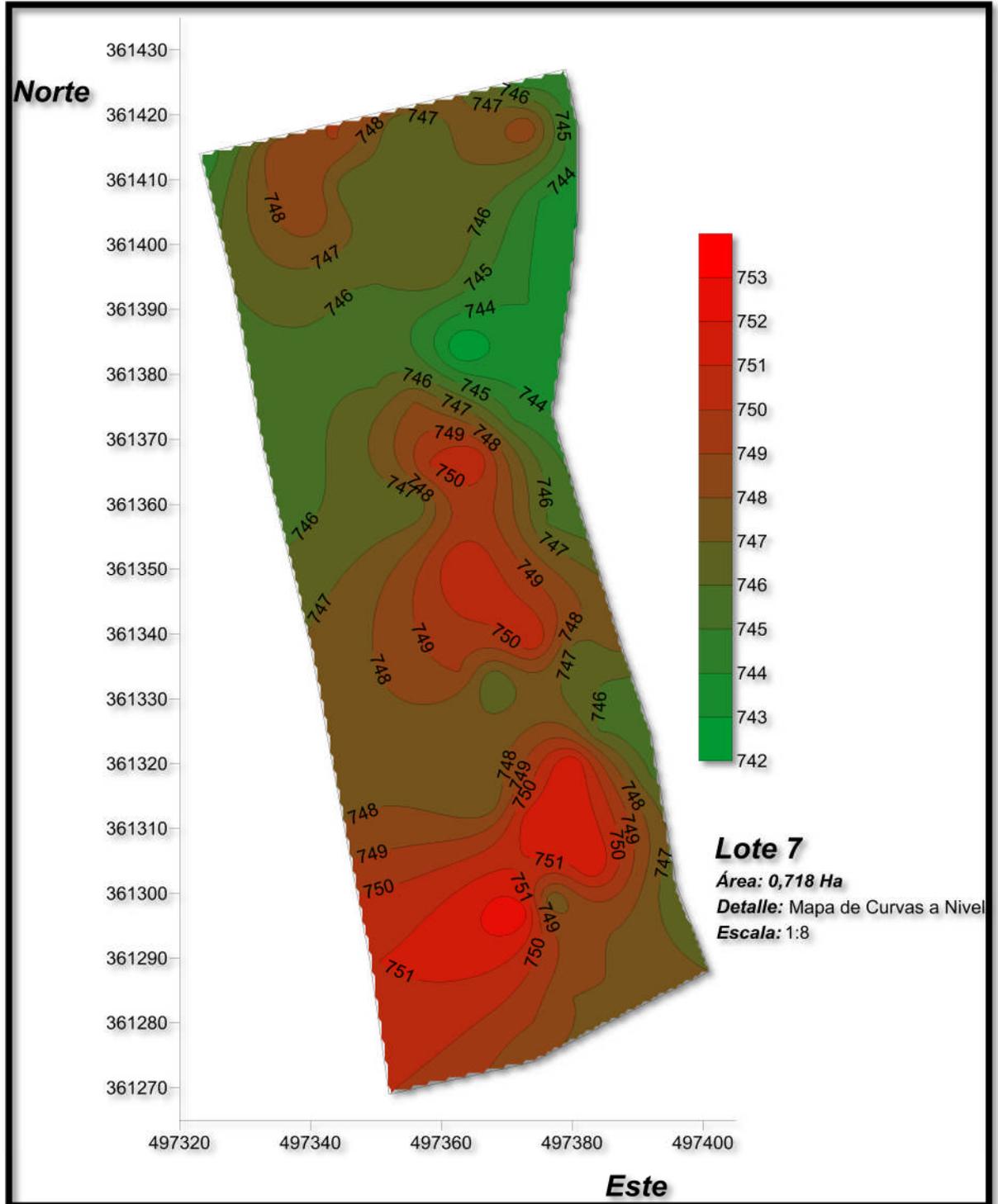
Anexo 6:

Curvas a nivel, lote 6:



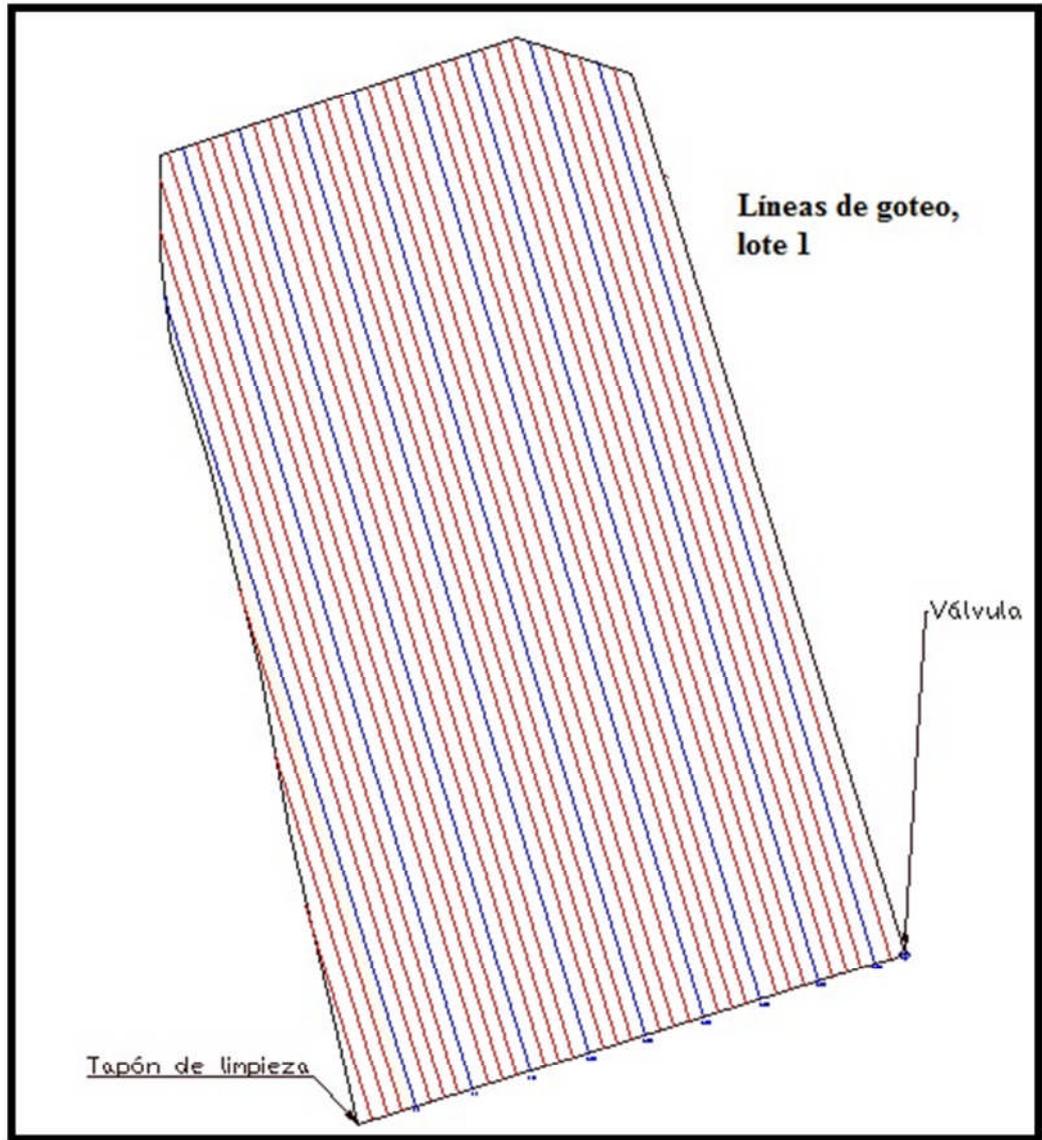
Anexo 7:

Curvas a nivel, lote 7:



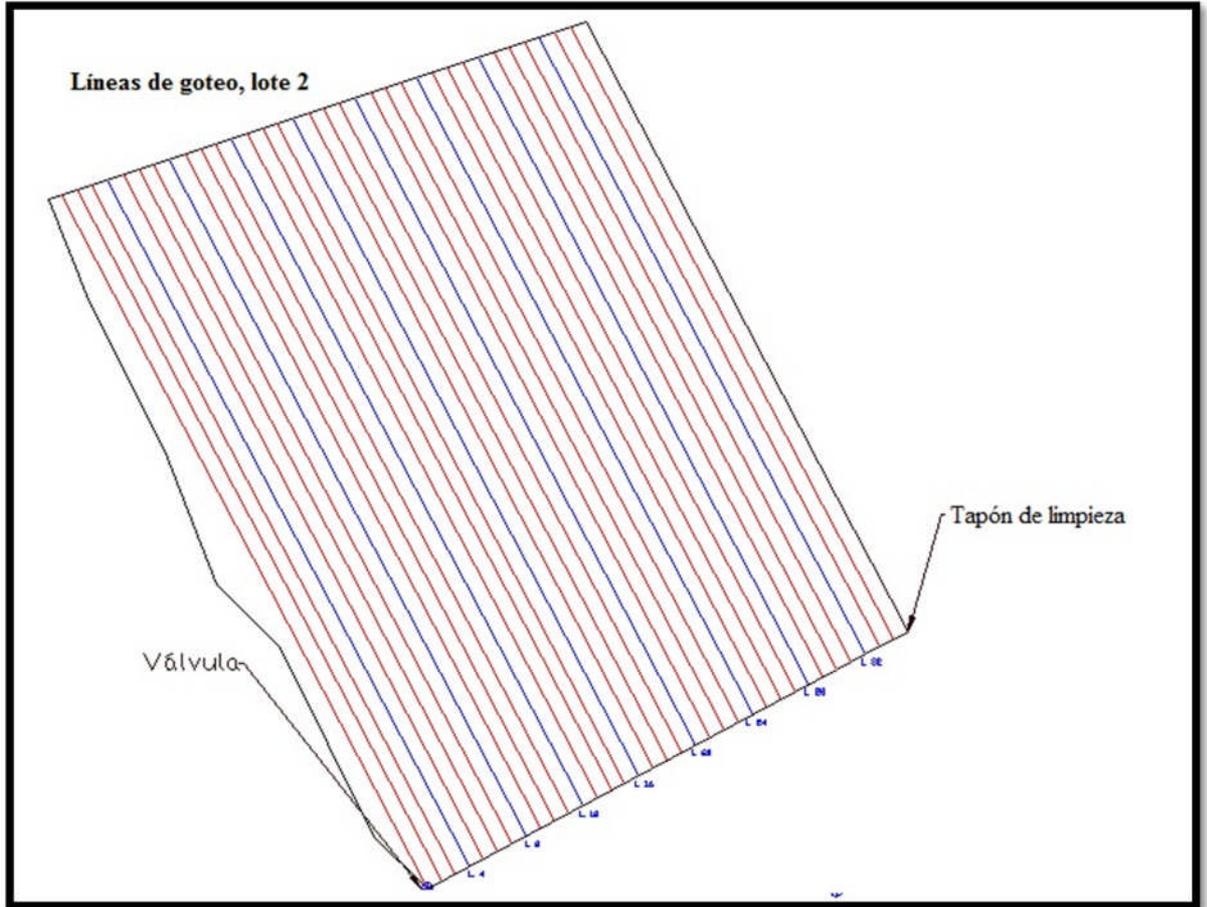
Anexo 8:

Líneas de goteo y accesorios, lote 1:



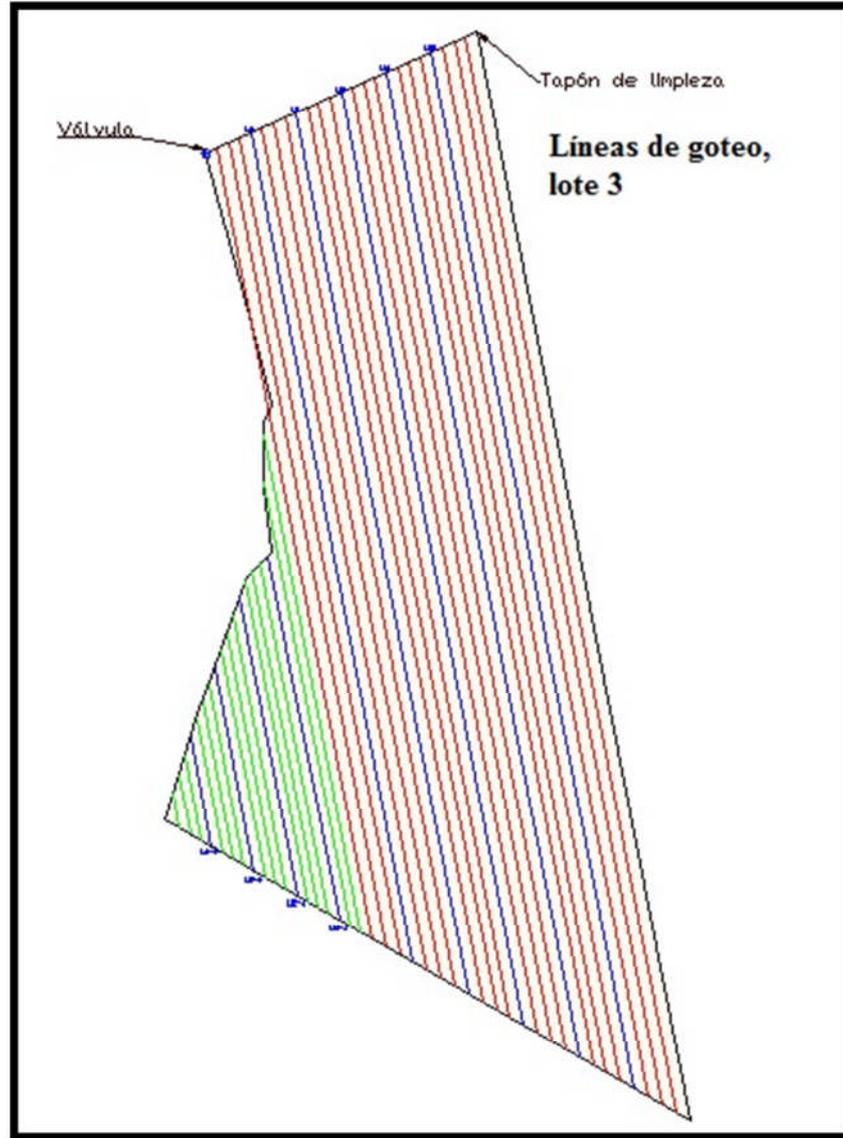
Anexo 9:

Líneas de goteo y accesorios, lote 2:



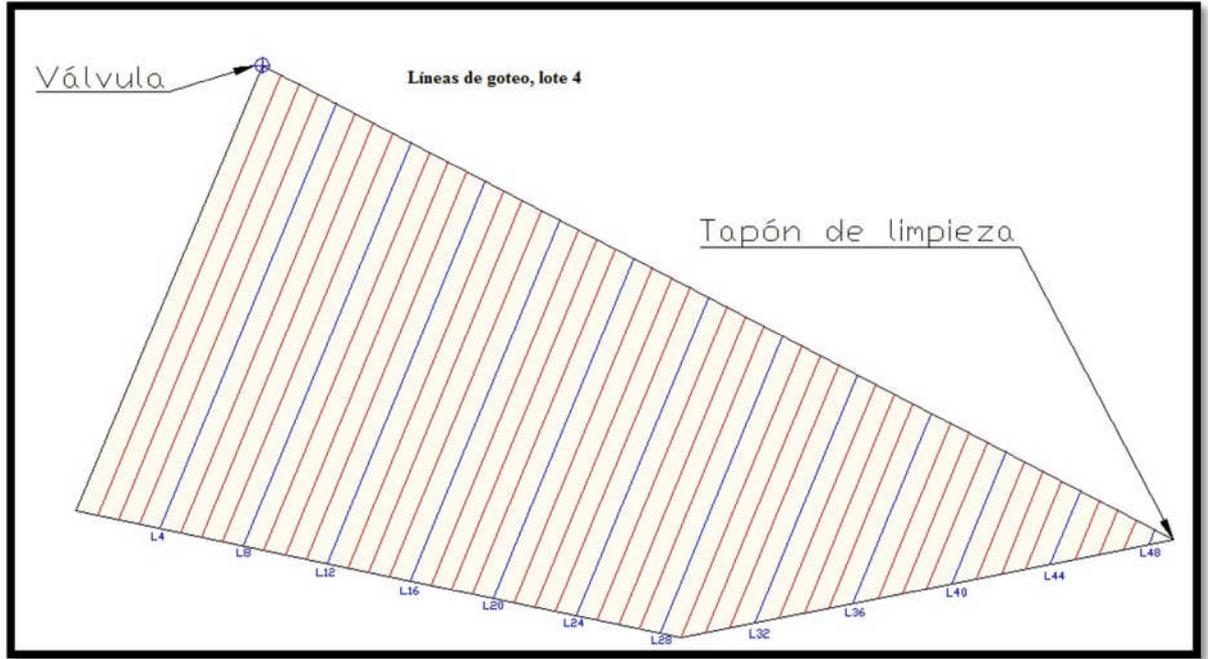
Anexo 10:

Líneas de goteo y accesorios, lote 3



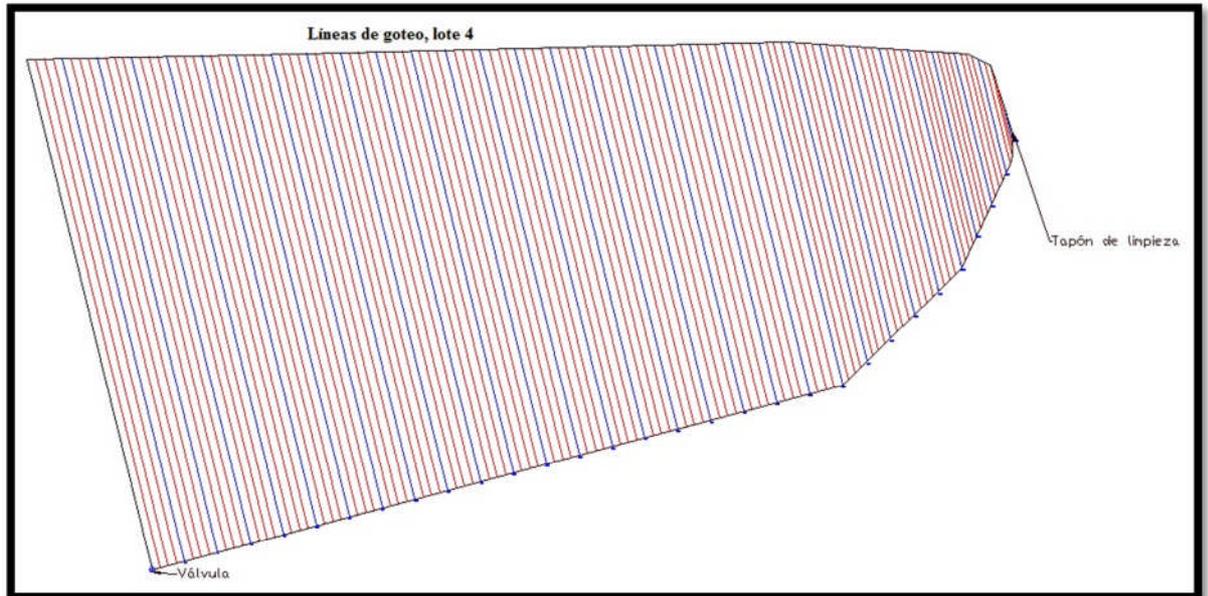
Anexo 11:

Líneas de goteo y accesorios, lote 4



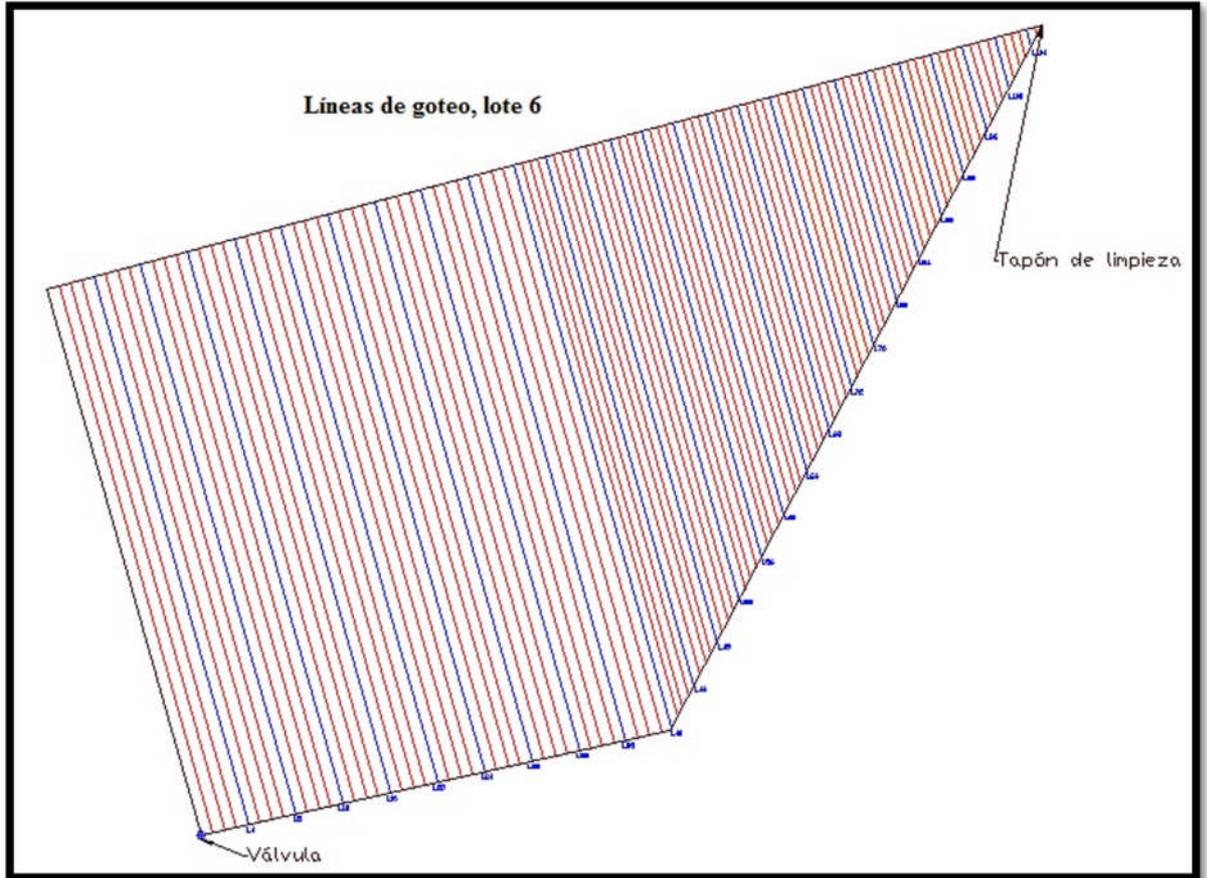
Anexo 12:

Líneas de goteo y accesorios, lote 5



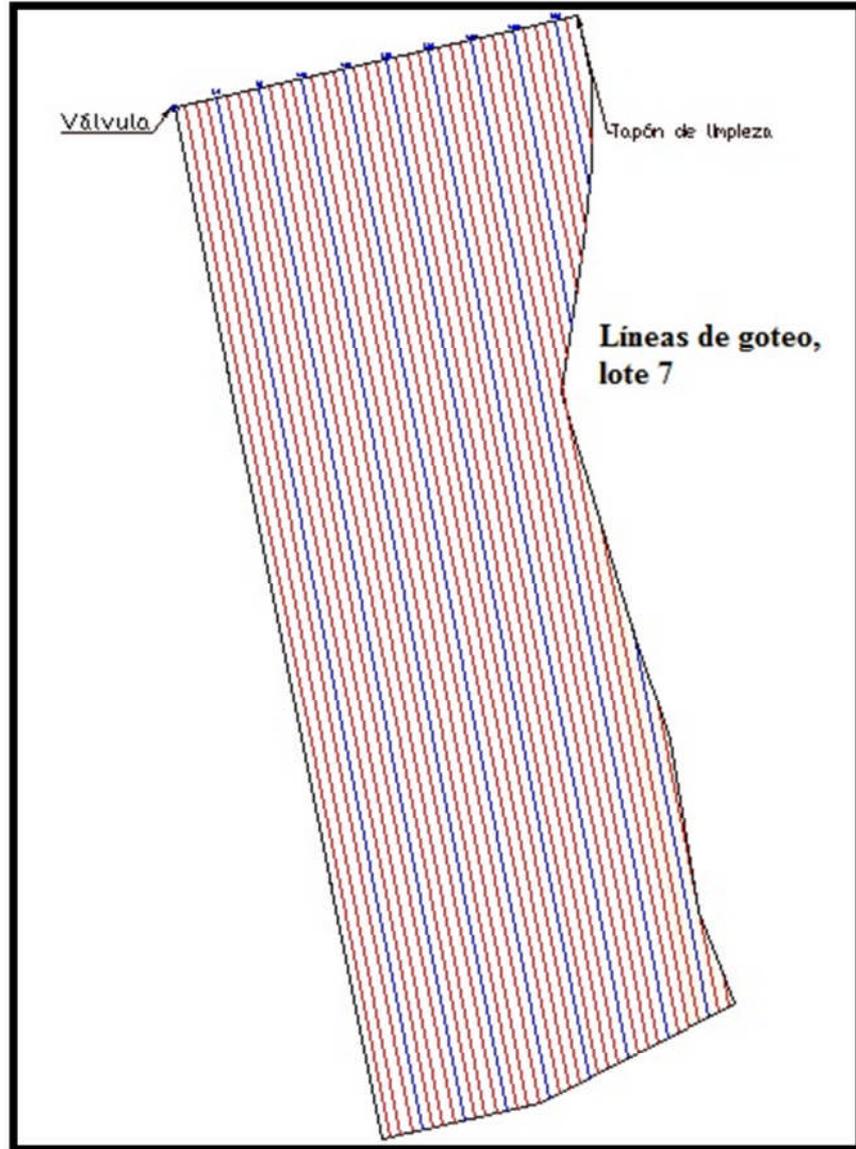
Anexo 13.

Líneas de goteo y accesorios, lote 6



Anexo 14.

Líneas de goteo y accesorios, lote 7



Anexo 15:

Especificaciones técnicas para las tuberías de PVC

Diámetro Nominal		SDR	Presión de trabajo (Kg/cm ²)	Longitud de tubo (m)	Diámetro Exterior	Diámetro Interior	Presión de ruptura (Kg/cm ²)	Peso por tubo (Kg)
(mm)	(Pulg.)				(mm)	(mm)		
12	1/2	13,5	22,1	6	21,34	18,2	70,2	0,87
12	1/2	Sch40	42	6	21,34	15,8		1,34
18	3/4	17	17,6	6	26,67	23,53	56,2	1,11
18	3/4	Sch40	34	6	26,7	20,9		1,79
25	1	17	17,6	6	33,4	29,48	56,2	1,73
25	1	Sch40	32	6	33,4	26,6		2,67
31	1 1/4	17	17,6	6	42,16	37,18	56,2	2,75
38	1 1/2	17	17,6	6	48,26	42,58	56,2	3,62
50	2	17	17,6	6	60,33	53,21	56,2	5,62
62	2 1/2	17	17,6	6	73,03	54,45	56,2	8,22
75	3	17	17,6	6	88,9	78,44	56,2	12,19
100	4	17	17,6	6	114,3	100,84	56,2	20,16
150	6	17	17,6	6	168,28	148,46	56,2	43,69
200	8	17	17,6	6	219,08	193,28	56,2	74,24
250	10	17	17,6	6	273,10	240,90	56,2	108
300	12	17	17,6	6	323,90	285,80	56,2	151,8
25	1	26	11,2	6	33,40	30,36	35,1	30,36
31	1 1/4	26	11,2	6	42,16	38,9	35,1	38,90
38	1 1/2	26	11,2	6	48,26	44,56	35,1	44,56
50	2	26	11,2	6	60,33	55,71	35,1	55,71
62	2 1/2	26	11,2	6	73,03	67,45	35,1	67,45
75	3	26	11,2	6	88,90	82,04	35,1	82,04
100	4	26	11,2	6	114,30	105,52	35,1	105,52
150	6	26	11,2	6	168,28	155,32	35,1	155,32
200	8	26	11,2	6	219,08	202,22	35,1	202,22
250	10	26	11,2	6	273,05	252,07	35,1	252,07
300	12	26	11,2	6	323,85	298,95	35,1	298,95
31	1 1/4	32,5	8,8	6	42,20	39,00	28,1	1,67
38	1 1/2	32,5	8,8	6	48,26	45,22	28,1	1,855
50	2	32,5	8,8	6	60,33	56,63	28,1	2,899
62	2 1/2	32,5	8,8	6	73,03	68,55	28,1	4,249
75	3	32,5	8,8	6	88,90	83,42	28,1	6,58
100	4	32,5	8,8	6	114,30	107,28	28,1	10,84
150	6	32,5	8,8	6	168,28	157,92	28,1	23,54
200	8	32,5	8,8	6	219,08	205,62	28,1	39,94
250	10	32,5	8,8	6	273,05	256,23	28,1	62,22
300	12	32,5	8,8	6	323,85	303,93	28,1	87,51
31	1 1/4	41	7,0	6	42,16	39,80	22,1	1,08
38	1 1/2	41	7,0	6	48,26	45,90	22,1	1,45
50	2	41	7,0	6	60,32	57,38	22,1	2,23
62	2 1/2	41	7,0	6	73,03	69,46	22,1	3,10
75	3	41	7,0	6	88,90	84,58	22,1	5,18
100	4	41	7,0	6	144,30	108,72	22,1	8,74
150	6	41	7,0	6	168,28	160,08	22,1	18,9
200	8	41	7,0	6	219,08	208,42	22,1	31,92
250	10	41	7,0	6	273,05	259,75	22,1	49,58
300	12	41	7,0	6	323,85	308,05	22,1	69,86
380	15	41	7,0	6	388,60	369,70	22,1	93,6

- **Anexo 16**

Información técnica de los goteros

Caudal (l/h)	Rango de presión de trabajo (bar)	Área de infiltración (mm²)	Filtración recomendada (micras)/(mesh)	Constante k
0,6	0,25-2,5	39	130/120	0,6
1,0	0,40-2,5	39	130/120	1,0
1,6	0,40-2,5	39	200/80	1,6
2,0	0,40-3,0	39	200/80	2,0
3,0	0,40-3,0	39	200/80	3,0
3,6	0,60-3,0	39	200/80	3,6

Información técnica de las mangueras de goteo

Modelo	Diámetro interno (mm)	Espesor de pared (mm)	Diámetro externo (mm)	Presión máxima de trabajo (bar)	Espaciamiento entre goteros (m)
16009	14,2	0,9	16,0	3,0	0,2-1,0
16010	14,2	1,0	16,2	3,0	0,2-1,0
16012	14,2	1,2	16,6	3,0	0,2-1,0
20010	17,5	1,0	19,5	3,0	0,2-1,0
20012	17,5	1,2	19,9	3,0	0,2-1,0
23009	20,8	0,9	22,6	3,0	0,25-1,0

- **Anexo 17**

Temperaturas medias del año 2012

Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	22,8	26,1	23,2	24,6	22,4	23,6	23,5	23,7	23,7	21,9	21,8	22,3
2	23,0	25,9	23,3	23,4	23,2	23,7	23,7	23,6	22,8	23,4	21,9	23,0
3	21,8	26,1	23,8	22,7	24,0	23,4	23,0	23,5	22,3	23,9	22,6	22,6
4	22,2	26,4	24,2	23,2	23,1	24,0	22,6	23,1	22,3	23,6	23,7	23,2
5	22,5	27,2	23,6	23,3	23,0	23,5	22,8	23,3	22,5	22,2	23,4	22,2
6	21,4	24,6	23,0	23,2	22,6	23,3	22,7	23,1	23,8	22,3	23,1	22,6
7	22,4	23,2	23,7	23,2	22,8	24,3	23,3	23,2	23,1	22,1	22,4	22,4
8	23,3	23,5	23,5	22,6	23,1	24,3	23,4	22,9	21,9	22,4	23,4	22,5
9	22,3	22,5	23,5	23,0	23,0	23,0	23,6	22,8	22,9	23,1	23,1	22,7
10	22,3	23,4	23,8	23,5	23,2	23,6	23,8	22,3	22,6	22,7	23,3	23,6
11	23,1	22,9	23,8	22,0	22,9	23,2	22,9	22,5	23,4	22,8	23,1	24,0
12	23,5	22,8	23,4	23,2	22,9	22,9	23,0	22,7	23,9	22,7	23,0	22,8
13	23,2	22,8	23,6	24,0	22,7	22,0	23,0	23,0	22,3	23,4	23,4	22,9
14	22,4	22,6	23,9	24,0	23,0	22,7	22,8	21,8	23,0	22,0	22,7	22,2
15	22,1	23,1	24,1	24,5	23,1	23,8	22,9	22,9	23,3	22,3	23,4	22,6
16	22,8	23,4	24,1	24,0	23,9	23,0	23,7	22,9	23,2	22,6	23,3	23,4
17	22,1	22,8	23,7	21,7	24,7	22,0	23,3	22,2	22,7	22,3	22,3	23,5
18	22,1	22,9	23,5	22,2	24,0	23,0	23,1	22,8	23,0	21,7	22,1	23,0
19	22,0	23,5	22,8	23,1	22,8	24,5	24,0	22,9	23,3	22,0	22,5	22,3
20	22,0	22,8	23,7	23,2	23,2	24,4	23,3	22,3	23,8	22,6	23,2	22,8
21	22,7	22,3	23,5	22,8	23,6	23,4	22,9	22,6	22,5	22,3	22,7	22,3
22	22,7	22,4	23,7	23,6	23,4	22,7	23,4	22,6	21,6	22,7	22,1	22,3

Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
23	25,7	22,8	24,2	22,9	23,9	23,6	22,8	22,4	22,5	22,1	22,5	22,1
24	24,6	23,1	24,6	23,1	23,2	23,2	21,0	22,8	21,7	20,7	23,2	23,0
25	25,9	23,2	23,5	24,4	23,5	22,9	23,4	22,6	22,7	20,7	22,1	21,7
26	26,1	22,7	24,0	23,6	22,8	23,0	24,4	22,8	22,7	21,5	22,2	22,8
27	26,7	22,7	24,3	21,3	23,7	23,0	24,2	23,7	22,8	23,5	23,5	23,4
28	26,8	22,7	23,7	22,9	23,9	23,0	21,8	22,9	22,6	23,5	23,2	23,6
29	26,2	23,0	24,2	23,8	23,4	22,4	21,8	22,7	22,6	22,3	21,8	23,7
30	25,3		24,3	23,5	23,7	21,9	22,6	22,3	22,6	22,4	21,8	23,3
31	25,7		25,4		23,5		23,3	22,7		21,8		22,8
Promedio	23,5	23,5	23,8	23,2	23,3	23,2	23,1	22,8	22,8	22,4	22,8	22,8