UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

En los tesoros de la sabiduría está la glorificación de la vida

1859

ÁREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA AGRICOLA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO PARA PASTOS EN LA FINCA LANDAPO DE LA PARROQUIA LAURO GUERRERO, CANTÓN PALTAS, PROVINCIA DE LOJA

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Agrícola

AUTOR

Cristian Pedro Gallegos Díaz

DIRECTOR

Ing. Marco Reinoso Acaro, M.Sc

LOJA – ECUADOR

2016

CERTIFICACIÓN

Que el presente trabajo de investigación titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO PARA PASTOS EN LA FINCA LANDAPO DE LA PARROQUIA LAURO GUERRERO, CANTÓN PALTAS, PROVINCIA DE LOJA,** de la autoría del Señor **Cristian Pedro Gallegos Díaz**, egresado de la Carrera de Ingeniería Agrícola, ha sido dirigido y prolijamente revisado desde el inicio hasta el final de su ejecución; por lo tanto autorizo su respectiva publicación.

Loja, abril de 2016

Lo certifico:

Ing. Marco Reinoso Acaro, M.Sc.
DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado, luego de revisar y verificar que se ha cumplido con la introducción de las observaciones realizadas al trabajo de investigación **"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO PARA PASTOS EN LA FINCA LANDAPO DE LA PARROQUIA LAURO GUERRERO, CANTÓN PALTAS, PROVINCIA DE LOJA"**, aprueban y autoriza su impresión y publicación final.

Loja, abril de 2016

Ing. Miguel Ángel Villamagua
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Luis F. Sivisaca Caraguay
VOCAL DEL TRIBUNAL

Ing. Luis G. Valarezo Manosalvas
VOCAL DEL TRIBUNAL

AUTORÍA

Yo, Cristian Pedro Gallegos Díaz, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Autor: Cristian Pedro Gallegos Díaz

Firma: _____

Cédula: 1103766661

Fecha: 25 de abril de 2016

CARTA DE AUTORIZACIÓN

Yo, Cristian Pedro Gallegos Díaz, declaro ser autor de la tesis titulada **"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO PARA PASTOS EN LA FINCA LANDAPO DE LA PARROQUIA LAURO GUERRERO, CANTÓN PALTAS, PROVINCIA DE LOJA"**, como requisito para optar al grado de: Ingeniero Agrícola, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

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

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

Para constancia de la autorización, en la ciudad de Loja, a los veinte y cinco días del mes de abril de dos mil dieseis, firma el autor:

Firma: _____

Autor: Cristian Pedro Gallegos Díaz

Cédula: 1103766661

Dirección: Calle José María Samaniego y Av. Salvador Bustamante Celi, Parroquia el valle, Loja- Ecuador

Correo electrónico: cristh.999@gmail.com

Teléfono: (072) 2613403 Celular: 0992673118

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Marco Reinoso Acaro, M.Sc

Tribunal de grado: Ing. Miguel Ángel Villamagua, M.Sc

Ing. Luis Sivisaca Caraguay, M.Sc

Ing. Luis Valarezo Manosalvas, M.Sc

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a Dios, por haberme permitido culminar esta linda carrera y bendecirme, para llegar a cumplir mi formación académica, y por tenerme con vida y salud; de la misma manera, agradezco a mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional.

El presente proyecto de riego, nunca podría haberlo realizado y finalizado, bajo la dirección del Ingeniero Marco Reinoso, mi más sincero agradecimiento, por sus conocimientos impartidos con gran entusiasmo y motivación, que da a entender, de forma sencilla la práctica de riego, y además por sus consejos, paciencia y buena disposición.

Un especial reconocimiento a la Universidad Nacional de Loja, al Área Agropecuaria de los Recursos Naturales Renovables, por darme la oportunidad de estudiar, y ser un profesional; gracias al gran talento humano de la Carrera de Ingeniería Agrícola, en especial aquellos Profesores que contribuyeron a lo largo de mi formación estudiantil, mil gracias por su enseñanza, paciencia y exigencia, que se requiere para formar un excelente profesional.

De igual manera agradezco al tribunal de grado, por sus aportes y sugerencias, en la presente tesis, que me sirvieron para mejorar la presentación del documento, y tenga los menos errores posibles.

Finalmente, dejo constancia de mi agradecimiento por el apoyo brindado por parte de mis familiares y amigos, algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Para todos ellos, muchas gracias y Dios los bendiga siempre.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme guiado y cuidarte en todo lugar, y permitirme cumplir mi formación universitaria.

Con cariño a mis padres: Ing. Pedro Gallegos y Lic. Merci Díaz, y mis hermanos: Pablo Fernando y Dr. Nury Valeria, por el apoyo incondicional y sus buenos consejos, sin importar nuestras diferencias de opiniones, y creyeron en mí, en esta ardua formación académica; y, a mis amigos y familiares por su ayuda y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

Cristian Pedro Gallegos Díaz

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN II
CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO III
AUTORÍA IV
CARTA DE AUTORIZACIÓN V
AGRADECIMIENTO VI
DEDICATORIA VII
ÍNDICE GENERAL VIII
RESUMEN XIII
ABSTRACT XIV
I. INTRODUCCION 1
II. REVISIÓN BIBLIOGRAFÍCA 3
2.1. DEFINICIÓN DE RIEGO 3
2.2. MÉTODOS DE RIEGO 3
2.2.1. Riego Gravitacional 4
2.2.2. Riego subsuperficial 4
2.2.3. Riego Presurizado 4
2.3. RIEGO POR ASPERSIÓN 5
2.3.1. Ventajas y desventajas del riego presurizado 5
2.3.2. Clasificación de los sistemas de riego por aspersión 6
2.3.3. Componentes de un sistema de riego por aspersión 8
2.4. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO 15
2.4.1. Formas de expresar el contenido de agua en el suelo 15
2.5. ENERGÍA DEL AGUA EN EL SUELO 19
2.5.1. Potencial del agua en el suelo 19
2.5.1.1. Potencial Gravitacional 20
2.5.1.2. Potencial Matricial 21
2.5.1.3. Potencial Osmótico 21
2.5.1.4. Potencial de presión o en suelos saturados 22
2.5.1.5. Aplicaciones en el riego 22
2.5.2. Curva de retención del agua del suelo 22
2.5.2.1. Factores que determinan la forma de curva de retención de agua en el suelo 23
2.5.2.2. Aplicaciones de la curva de retención 24

2.5.2.2.1. Evaluación de las condiciones físicas del suelo 26
2.6. INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO 27
2.6.1. Factores que afectan la infiltración 27
2.6.2. Ecuaciones empíricas de la velocidad del agua en el suelo 28
2.7. DISEÑO AGRONÓMICO 32
2.7.1. Necesidades de agua del cultivo 32
2.7.2. Demandas de riego 39
2.7.3. Parámetros de riego 40
2.7.4. Elección del aspersor 41
2.8. DISEÑO HIDRÁULICO 47
2.8.1. Hidráulica de tuberías 47
2.8.1.1. Pérdidas de carga por fricción longitudinal 48
2.8.1.2. Pérdidas locales 48
2.8.1.3. Diseño del lateral 49
2.8.1.3.1. Coeficiente de Christiansen (F) 49
2.8.1.3.2. Criterios para determinar el dimensionamiento de un ramal de aspersores 50
2.8.1.3.3. Cálculo de un ramal portaaspersores 51
2.8.1.4. Presión total del sistema 56
2.9. EFICIENCIA DE RIEGO 57
2.9.1. Eficiencia de Distribución: Coeficiente de Uniformidad de Christiansen 57
2.9.2. La uniformidad de distribución (UD) 58
2.9.4. Factores que depende la uniformidad de distribución 59
2.10. IMPORTANCIA DEL RIEGO EN LOS PASTOS PARA LA ALIMENTACIÓN BOVINA 61
2.10.1. Condiciones climáticas 61
2.10.2. Aplicación de láminas de riego 61
2.10.3. Métodos de riego en pasturas 62
2.11. TRABAJOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSIÓN 63
III. MATERIALES Y MÉTODOS 66
3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 66
3.2. FUENTE DE AGUA 67
3.3. CONDICIONES CLIMÁTICAS 67
3.4. MATERIALES 68
3.5. METODOLOGÍA 69
3.5.1. Metodología para el primer objetivo 69

3.5.1.1. Georeferenciación y medición del caudal de la fuente de abastecimiento 69
3.5.1.2. Levantamiento planímetro de la superficie a regarse 69
3.5.1.3. Estudio de suelo 71
3.5.1.4. Diseño agronómico 75
3.5.1.5. Propuesta para el manejo y operación del sistema de riego por aspersión 86
3.5.1.6. Diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión 87
3.5.2. Metodología para el segundo objetivo 95
3.5.2.1. Replanteo de ubicación de la red hidráulica 95
3.5.2.2. Instalación de la red de tuberías, accesorios complementarios y aspersor 95
3.5.2.3. Estructura de almacenamiento 96
3.5.3. Metodología para el tercer objetivo 98
3.5.3.1. Determinación del coeficiente de uniformidad (CU) 100
3.5.3.2. Determinación de la uniformidad de distribución (UD) 100
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 101
4.1. RESULTADOS PARA EL PRIMER OBJETIVO 101
4.1.1. Fuente de agua 101
4.1.2. Levantamiento planímetro de la superficie a regarse 101
4.1.3. Estudio de suelos 102
4.1.3.1. Constantes hidrofísicas del suelos 102
4.1.3.2. Textura del suelo 104
4.1.3.3. Materia orgánica 105
4.1.3.4. Evaluación de las condiciones físicas del suelo 105
4.1.4. Velocidad de infiltración del agua en el suelo 106
4.1.5. Diseño agronómico 108
4.1.5.1. Determinación de la evapotranspiración del cultivo 108
4.1.5.2. Demandas de riego 110
4.1.5.3. Diseño del reservorio 112
4.1.5.4. Parámetros de riego 114
4.1.5.5. Selección del aspersor 116
4.1.6. Propuesta para el manejo y operación del sistema de riego por aspersión 118
4.1.7. Diseño hidráulico del sistema de riego 122
4.2. RESULTADO PARA EL SEGUNDO OBJETIVO 127
4.2.1. Tubería de conducción 127
4.2.2. Reservorio 127

4.2.3. Instalación del sifón 127
4.2.4. Tubería principal, secundaria y accesorios de riego 128
4.3. RESULTADOS PARA EL TERCER OBJETIVO 130
4.3.1. Coeficiente de uniformidad CU 130
4.3.2. Uniformidad de distribución UD 131
V. CONCLUSIONES 133
VI. RECOMENDACIONES 134
VII. BIBLIOGRAFÍA 135
VIII. ANEXOS 138

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO PARA PASTOS EN LA FINCA LANDAPO DE LA PARROQUIA LAURO GUERRERO, CANTÓN PALTAS, PROVINCIA DE LOJA

RESUMEN

En el periodo mayo – noviembre del 2015 en la finca Landapo perteneciente a la Parroquia Lauro Guerrero del Cantón Paltas, Provincia de Loja, se realizó el diseño e implementación de un sistema de riego presurizado para la producción de pasto en una superficie de 0,35 ha; el objetivo central del mismo, fue el de contribuir al manejo eficiente de los recursos suelo y agua a través del diseño e instalación de un sistema de riego por aspersión. Para evaluar físicamente el suelo, se tomaron muestras no disturbadas con la ayuda de los cilindros Koppecky de 100 cm^3; mientras que para determinar la textura y la materia orgánica, se tomaron muestras alteradas. Para el diseño agronómico, se calculó, las necesidades de riego del cultivo de pasto, para ello se empleó el método indirecto Thorthwaite considerando el meteoro de temperatura de la Estación Meteorológica de Catacocha. Con los resultados de los análisis de suelos (densidad aparente, contenidos de humedad: saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente); la profundidad radicular efectiva; y, las necesidades de riego máxima, se determinó, la lámina, tiempos y frecuencias de riego. Para el diseño hidráulico, se calculó de la red hidráulica, principal y secundaria, las mismas que fueron diseñadas a través de la fórmula de Hazen-Williams. Luego de ser instalado el sistema de riego, se procedió a evaluar mediante el coeficiente de uniformidad de Christiansen (Cu) del 80% y la uniformidad de distribución (UD) del 60%. Para determinar la superficie a regar, se diseñó y construyó un reservorio de 15,66 m^3, en el que se capta un caudal de 0,1 l/s. Los principales resultados alcanzados fueron los siguientes: la necesidad de riego máxima del cultivo fue de 1,84 mm/día; los suelos fueron evaluados físicamente como pobres; la velocidad de infiltración básica fue de 19,85 mm/h; la lámina de riego fue de 29,4 mm; la frecuencia de 12 días y el tiempo de riego de 186 minutos. El diámetro de la tubería principal y secundaria fue de 50 mm. Finalmente la energía requerida para el funcionamiento del sistema fue de 38 metros de columna de agua, obtenida a través de la diferencia de nivel topográfico, la cual es menor a la energía disponible (42,0 metros de columna de agua).

Palabras claves: riego por aspersión, diseño agronómico, diseño hidráulico, evaluación de uniformidad Cu

ABSTRACT

In the period May - November 2015 in the Landapo farm belonging to the Parish Lauro Guerrero Paltas Canton, Province of Loja, design and implementation of a pressurized irrigation system for grass production in an area of 0.35 was made he has; the central objective of the project was to contribute to the efficient management of soil and water resources through the design and installation of a sprinkler system. To physically evaluate the soil samples were taken undisturbed with the aid of cylinders Koppecky 100 cm^3; while determining the texture and organic matter, altered samples were taken. For agronomic design, it was calculated irrigation needs of growing grass, for it, Thorthwaite the indirect method was used considering the meteor temperature Catacocha Meteorological Station. With the results of soil analysis (bulk density, moisture content: saturation, field capacity and wilting point); the effective root depth; and maximum irrigation needs are determined, Blade, timing and frequency of irrigation. For the hydraulic design, it was calculated from the hydraulic main and secondary network, the same that were designed by the Hazen-Williams formula. After being installed the irrigation system, it was evaluated by Christiansen uniformity coefficient (Cu) of 80% and uniformity of distribution (UD) 60%. To determine the water surface, it was designed and built a 15,66 m^3 reservoir, wherein a flow rate of 0,1 l/s is taken. The main results achieved were as follows: the need for crop irrigation maximum was 1.84 mm / day; soils were physically evaluated as poor; basic infiltration rate was 19,85 mm / h; the irrigation depth was 29,4 mm; the frequency of 12 days and the run time of 186 minutes. The diameter of the primary and secondary pipe was 50 mm. Finally, the energy required for operation of the system was 38 meters water column, obtained through the differential topographic level, which is less than the available energy (42.0 meters water column).

Keywords: sprinkler irrigation, agronomy design, hydraulic design, evaluation of uniformity Cu

I. INTRODUCCION

La provincia de Loja, estacionalmente registra períodos de déficit de precipitación que se prolongan intermitentemente entre 8 y 9 meses al año, lo que determina que el éxito en la producción agropecuaria esté condicionado a la dotación oportuna de agua de riego; predomina una topografía irregular; con suelos ácidos; en donde de manera indiscriminada, se ha talado y quemado el bosque natural, para la producción de cultivos anuales y la ganadería bovina extensiva.

La técnica de riego que se utiliza es muy elemental y degradante del suelo, por cuanto, los agricultores riegan sus parcelas por gravedad, en base al tradicionalismo, la falta de conocimientos y de una adecuada capacitación, en donde se aplican caudales erosivos, lo que genera impresionantes procesos de formación de enormes cárcavas y de inestabilización total de las áreas de riego, a causa de la disolución de materiales tales como calizas y yeso; las graves pérdidas de agua y la aceleración de la erosión de los suelos, que se constituyen en la más grave amenaza ambiental.

Esta situación ha generado bajas eficiencias de riego parcelario que no alcanzan el 35%; lo que evidencia el mal uso y manejo del agua, generando con ello, un impacto ambiental grave y un resultado social, que se refleja en la pobreza generalizada del sector rural y los elevados índices de emigración.

El buen uso y manejo de los recursos suelo y agua, permitirán enfrentar los procesos de degradación del suelo, el desequilibrio hidrológico, y aumentar la producción y productividad agropecuaria; implementando para ello, obras de conservación de suelos y métodos de aplicación de agua eficientes, en concordancia con las características físicas, químicas, topográficas, climáticas, y de los cultivos.

Consecuentemente con lo señalado, se ha planteado la presente propuesta de diseño e implementación de un sistema de riego por aspersión para la producción de pastos en un área de 0,35 ha en la finca “Landapo” del Cantón Paltas, Provincia de Loja; para dar cumplimiento al presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

- Contribuir al manejo eficiente de los recursos suelo y agua en la práctica de riego a través del diseño e implementación de sistema de Riego.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un sistema de riego por aspersión para el cultivo de pasto en la Finca Landapo.

- Instalar un sistema de riego por aspersión.

- Evaluar la uniformidad de aplicación del agua por los emisores de riego.

II. REVISIÓN BIBLIOGRAFÍCA

2.1. Definición de Riego

El riego puede ser definido como la aplicación artificial de agua a los terrenos agrícolas para suplir al suelo la humedad requerida por las plantas de cultivo en ausencia de lluvia natural, esta práctica deberá aplicarse cuando el agua de lluvia no satisfaga las exigencias hídricas de los cultivos (Leitón, 1985).

El desarrollo bajo ciertas condiciones de una agricultura bajo riego, la necesidad de aumentar constantemente la producción, y la cada vez menor disponibilidad de agua para tales fines, hacen necesario sustituir por todas aquellas prácticas que conducen a un uso racional y adecuado del agua (Leitón, 1985).

La aplicación del agua en forma artificial a los cultivos forma parte de un sistema de riego, en el cual se consideran tres zonas básicas (Calvache, 2010):

a) Zona de captación
b) Zona de conducción
c) Zona de aplicación o uso del agua

2.2. Métodos de Riego

Se entiende por método de riego a la acción de distribuir el agua en los campos de cultivo de un modo uniforme y en la cantidad necesaria para que los cultivos puedan alcanzar su desarrollo normal.

La reposición de agua al suelo puede realizarse de diferente manera, según la técnica de riego utilizada, distinguiéndose básicamente los siguientes métodos de riego; riego superficial o gravitacional, riego subsuperficial, y riego presurizado (Chávez, 1978).

2.2.1. Riego Gravitacional

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

2.2.2. Riego subsuperficial

En este método de riego, el agua llega a la zona de raíces del cultivo mediante el proceso de ascenso capilar, debido a la presencia de una capa freática poco profunda, cuyo nivel bajo la superficie del suelo se regula por medio de zanjas o drenes de tubería (Chávez, 1978).

2.2.3. Riego Presurizado

Los métodos de riego presurizado se caracterizan por tener un sistema de distribución del agua a presión. Se trata de un sistema de riego mecanizado que asegura un control preciso de la cantidad de agua a aplicarse, adaptándose a cualquier condición del suelo, climas y topografía. Entre los principales métodos de riego se tienen el riego de aspersión, microaspersión y goteo (Cisneros, 2003).

2.3. Riego por aspersión

El riego por aspersión aplica el agua en forma de lluvia en una superficie circular. En los sistemas de riego en ladera generalmente se trabaja con una ala de riego compuesta de uno o dos aspersores, cincuenta metros de manguera de polietileno calibre cuarenta y diámetro igual a 1/2 pulgada o ¾ de pulgada. El ala se va cambiando de lugar hasta completar el humedecimiento de todo el lote (Avidan, 1993; Calvache, 1998).

Se puede considerar como una lluvia artificial, a través de la cual se riega un cultivo para su crecimiento y producción, con la ventaja de que esa lluvia es controlada para su manejo, tanto en tiempo como intensidad. En este sistema, el agua es llevada a presión hasta los distribuidores o aspersores, diseñados para trabajar a presiones y separación diferente (Leitón, 1985).

2.3.1. Ventajas y desventajas del riego presurizado

Según Valverde (2007), señala lo siguiente:

a) Ventajas

- ✓ Se asegura la explotación agrícola, al permitirla obtención de dos cosechas cuando en condiciones de secano solamente se consigue producir una.
- ✓ Reducción de la erosión del suelo.
- ✓ Necesita menor filtrado que el de goteo.
- ✓ Aplicación de agua con alta eficiencia alrededor del 75%.y se operan con bajos y altos caudales.
- ✓ Puede ser utilizado con facilidad en terrenos con pendiente pronunciadas.
- ✓ No afecta el material vegetal sometido a riego, debido que elimina la presión que el agua puede ofrecer a las plantas y como la distribución es homogénea sobre el material vegetal, el riego de la vegetación por aspersión es total y se distribuye suavemente el agua sobre el área deseada.

b) Desventajas

- ✓ Inversión inicial puede ser grande y limitantes a ciertos cultivos.
- ✓ Se necesita que el elevador de riego, este en posición vertical para el funcionamiento eficiente del aspersor.
- ✓ El viento distorsiona la distribución del riego y pérdidas por evaporación.
- ✓ En la implementación de riego para cultivos de pastos para ganado, se ve afectado por el pisoteo y además los emisores y tubos son dañados por los animales

2.3.2. Clasificación de los sistemas de riego por aspersión

El riego por aspersión es un método de riego mecanizado o presurizado, necesita de mecanismo que generan presión para mover el agua. Con este método de riego no es necesario nivelar el suelo y se puede regar el potrero recién sembrado sin causar problemas de erosión o de corrimiento de las semillas, si se usa presión y el aspersor adecuado (Cisneros, 2003).

Según Chávez (1978) clasifica los sistemas de riego por aspersión en dos grupos:

a) Sistemas estacionarios: permanecen en la misma posición mientras dura el riego y pueden ser:

- ✓ **Sistemas Móviles (portátil):** todos los elementos del sistema son móviles ninguna de sus partes es fija incluso puede serlo el grupo de bombeo. Los ramales de riego suelen ser de aluminio o de PVC y se instalan sobre la superficie del terreno. Cuando acaba el riego de una postura, los ramales con los aspersores se trasladan a la siguiente posición, requiriendo por ello una gran cantidad de mano de obra para el riego (Chávez, 1978).

- ✓ **Sistema Semifijo:** en este sistema son fijos el grupo de bombeo y la red de tuberías principales, que normalmente se encuentra enterrada. Esta tubería principal suele ser de PVC o fibrocemento, de ella derivan los hidrantes en donde se conectan los ramales de distribución (fijos o móviles), a los que se conectan los ramales de riego, que son móviles. Estos laterales móviles deben ser fácilmente transportables por lo que suelen ser de materiales ligeros y que soporten bien el estar a la intemperie (aluminio, polietileno). A los ramales se acoplan los aspersores directamente en las respectivas posiciones de riego (Chávez, 1978).

- ✓ **Sistema fijo**: todos los elementos de este sistema son fijos (bombeo, red de riego y emisores), salvo en algunos casos donde los aspersores son desmontables y van ocupando sucesivas posiciones a lo largo de los ramales de riego. La red de riego puede instalarse únicamente para la campaña o ser permanente. Dentro de los sistemas fijos se pueden distinguir dos tipo, los sistemas aéreos y los enterrados. Los sistemas fijos aéreos constan de una red de tuberías principales enterradas y unos ramales de riego que se encuentran sobre el terreno (Chávez, 1978).

b) Sistemas mecanizados: se desplazan mientras se aplican la lámina de riego, se recomienda en superficies regulares con pendientes moderadas es conveniente cuando se necesitan riegos frecuentes y poco abundantes entre los principales se tiene:

- ✓ **Cañones de riego:** el cañón motorizado de riego consta de un aspersor de gran alcance y caudal (cañón) montado sobre un carro o patín y conectado al suministro de agua mediante una manguera. Este sistema de riego utiliza aspersores rotativos de gran tamaño, que funcionan con una elevada presión y forman gotas bastante grandes. Son adecuados para dar riegos de apoyo a cultivos con bajas necesidades de riego y es bastante utilizado para praderas de zonas semi-húmedas (Chávez, 1978).

- ✓ **Pivote:** forma parte de los sistemas de riego por aspersión mecanizados. Es un ramal de riego con un extremo fijo, por el que recibe el agua y la energía eléctrica, y otro móvil que describe un círculo girando alrededor del primero. El equipo de riego se basa en el movimiento de una tubería portaemisores que se apoya en unas torres automotrices. Estas torres están dotadas de un motor eléctrico y dos ruedas neumáticas. La tubería, que normalmente es de acero galvanizado, sirve junto con barras o cables, de elemento resistente para vencer la distancia entre torres (Chávez, 1978).

- ✓ **Laterales de avance frontal:** este equipo es de estructura semejante al pivote. Consiste en un ramal de riego montado sobre unas torres automotrices de dos ruedas que se desplazan en sentido perpendicular al ramal de riego. El lateral gira funcionando como eje de un grupo de ruegas grandes desplazados por un motor (Chávez, 1978).

Riega superficies de forma rectangular La tubería portaemisores, los emisores y los sistemas de propulsión son semejantes Al pivote. Sin embargo, la forma de suministrar agua al equipo

y el mecanismo de alineamiento presentan diferencias respecto al equipo pivote (Chávez, 1978).

2.3.3. Componentes de un sistema de riego por aspersión

Un equipo de riego presurizado básicamente consiste en:

2.3.3.1. Fuente de agua

Según Cadena (2012), señala que:

El agua puede provenir de una fuente superficial o subterránea y de la que se debe tener en cuenta, la ubicación, la calidad del agua y el caudal.

- En cuanto a ubicación: los factores que influirán en el diseño son: el desnivel, la distancia y los accidentes topográficos entre la fuente de agua y el terreno a regar.

- En la calidad del agua se deberá conocer sobre el contenido de sedimentos, materia orgánica y sales.

- El caudal deber ser un dato muy seguro.

2.3.3.2. Fuente de energía

Según Vivar (1995):

La fuente puede ser de dos tipos: de equipo de bombeo encargado de proporcionar agua a presión. En algunas zonas no resulta necesario este equipo ya que se dispone de presión natural

- **Grupo de bombeo**

Consiste básicamente en un conjunto motor – bomba, de características ajustadas a las necesidades de caudal y presión del equipo a instalarse y que utiliza como fuente de energía

cualquier combustible tradicional, que en orden de eficiencia serían: electricidad, gasolina y diésel.

- **Desnivel topográfico**

Se utiliza la presión de la gravedad que viene a ser, por el diferencial de elevación o altitud en el terreno, la misma que representa a la máxima energía disponible en el sistema, para llevar el agua hacia un determinado punto.

2.3.3.3. Sistema de distribución de agua

Se compone por tuberías principales, secundarias; se instalan fijas o móviles, dependiendo del tipo del sistema de riego por aspersión a utilizar; comúnmente se colocan fijas a fin de utilizar menos mano de obra en la operación del sistema, es conveniente que vayan enterradas.

- **Tuberías principales**

Son conocidas como tuberías de conducción o transporte, se caracterizan por ser las de mayor diámetro dentro del sistema y que generalmente son las que transportan los mayores caudales y trabajan a las mayores presiones. No tienen servicio de aspersores en transitó, salvo en especiales condiciones, y en instalaciones fijas o semifijas van enterradas. Las disponibles en el mercado están fabricadas de hierro galvanizado, aluminio, PVC o PE (Vivar, 1995).

- **Tuberías secundarias**

Llamadas también tuberías de distribución, constituyen la infraestructura necesaria para una eficaz cobertura del regadío, pues en su mayor parte están compuestas por lo que en riego por aspersión se conocen como laterales, que no son más que las tuberías que están colocadas sobre o bajo la superficie del terreno (dependiendo del tipo de sistema instalado y que soportan y conectan los elevadores en cuyo extremo superior se localizan los aspersores. Esta red secundaria está compuesta por tuberías de menor diámetro y son generalmente de aluminio, PVC o PE (Vivar, 1995).

2.3.3.4. Instalaciones complementarias y elementos auxiliares

Están constituidas por equipos y accesorios que pueden o no incluirse en un sistema de riego. Generalmente son equipos de fertilización, accesorios de conexión, medidores de caudal y presión entre otros.

- **Accesorios**

Es un conjunto de piezas que se utilizan para pegar y ensamblar las tuberías y construir los cabezales de campo, los accesorios a utilizarse tubería PVC, codos, uniones, válvulas, filtros, reguladores de presión, las características constructivas de estos materiales deben ser suficientes para soportar las altas presiones del Sistema (Vivar, 1995).

- **Estructura de almacenamiento**

Anten & Willet (2000) señalan que, el reservorio cumple la función de almacenar el turno de riego, que compense la necesidad hídrica de los cultivos, y poder planificar mejor el agua de riego, y a la vez abastecer de agua en forma permanente al sistema; por lo general se construyen en la parte alta, que tenga la suficiente energía que viene a ser el desnivel entre la fuente de agua y el terreno a irrigar, de esta manera permite el funcionamiento hidráulico del sistema.

Considerando los materiales que se emplean en la construcción poder ser:

Reservorios de tierra, revestidos internamente.
Reservorios con muros de concreto ciclópeo o de piedra
Reservorios con muros de concreto armado.
Reservorios con muros de contrafuerte.

2.3.3.5. Aspersores

Dispositivos de aspersión o emisores, que son los elementos encargados de aplicar el agua en forma de lluvia. Estos dispositivos pueden ser tuberías perforadas, difusores fijos, toberas, boquillas o aspersores, entre otros.

Son aparatos construidos de diversos materiales, generalmente metal y plástico, con diferentes características de trabajo y utilizados para distribuir el agua de riego en forma similar a la lluvia natural, en áreas de cultivo (Vivar, 1995).

Componentes de un aspersor

Señala Vivar (1995) que, la mayoría de aspersores constan básicamente de las siguientes partes:

- **Base:** sirven para conectar la tubería de alimentación (elevador) y el cuerpo del aspersor, está conformada por: la base propiamente dicha, tubo giratorio, empaquetaduras, resorte y manga protectora contra la arena.

- **Cuerpo:** es la parte del aspersor por donde fluye el agua para riego. Se compone de: un eje para el martillo, amortiguado para absorber el golpe del martillo y boquillas para distribuir el agua.

- **Martillo:** cumple la función de pulverizar el chorro de agua, provocar la rotación del aspersor, mantener el ritmo de trabajo, y el cual vuelve a su posición inicial por la acción de un resorte de tensión. Se compone de una cuchara en forma de vela y un contrapeso.

2.3.3.5.1. Tipos de aspersores, por su forma de girar

El aspersor es la parte más importante más importante de este sistema de riego porque es el elemento que va a distribuir el agua sobre el cultivo, de sus características depende la uniformidad de esa distribución lo cual determinará la eficiencia del sistema.

Según Cadena (2012), señala los siguientes:

a) **De martillo o de impacto:** giran a impulsos del chorro de agua sobre un brazo oscilante, donde el mecanismo de acción del giro es un martillo sujeto a un eje sobre el cuerpo del aspersor accionado por un resorte, este martillo desplazado por el chorro produce un golpe intermitente sobre el aspersor produciendo giros pausados.

b) **De turbina:** tienen un giro continuo, al discurrir el agua por un mecanismo de turbina.

c) **Balancín:** en este mecanismo de acción de giro es un balancín accionado por su propio peso, el cual se interpone intermitentemente al chorro de agua ocasionando un giro pausado del aspersor, se les conoce también como aspersores “turbo – martillo”.

d) **Giro parcial:** su mecanismo de giro parcial, muy útil para regar en los bordes y en las esquinas de los lotes.

e) **Giro rápido:** suelen emplearse en el riego del césped (6 vueltas por minuto) y de giro lento (1/4 a 3 vueltas por minuto) para uso de cultivos agrícolas, funcionan con caudales de 0.03 l/s a 0.6 l/s (depende de los dispositivos que ofrecen al mercado las casas comerciales de riego agrícola).

f) **Trompo:** se utiliza en especial para el riego de plantaciones de árboles frutales y jardines.

g) **Hélice:** se utiliza en equipos fijos para cultivos de campo.

h) **Mini-aspersor:** son utilizados en la aspersión fija de plantaciones de árboles frutales y jardines.

2.3.3.5.2. Tipos de aspersores, por su presión de trabajo

Se dan a conocer los tipos y tamaños de diversos de los aspersores que varían desde los de pequeña presión de una boquilla utilizados para hortalizas y hasta grandes presiones con grandes boquillas funcionan con altas presiones generalmente se utilizan para cultivo de pastos (Gaete, 2001).

Según Cadena (2012), señala los siguientes:

a) **De baja presión:** se clasifican así cuando tienen una presión menor o igual a 1,5 kg/cm^2, son capaces de mojar un radio de hasta 12 m como máximo, producen un riego uniforme aun en condiciones desfavorables de viento, pero requieren un espaciamiento entre aspersores inferior a 12 m.

b) **De media presión:** entre 1,5 kg/cm^2 y 4,5 kg/cm^2, el radio mojado varía entre los 12 y 25 m, se emplean en espaciamientos de entre 12 y 24 m, suelen llevar boquillas de diámetro comprendido entre 4 y 7 mm.

c) **De alta presión:** cuando la presión de trabajo es superior a 4,5 kg/cm^2, el radio de cobertura puede alcanzar hasta 60 m, los más utilizados en la agricultura arrojan de 6 a 40 m^3/hora. Dan baja uniformidad en zonas con presencia de vientos. Asimismo el tamaño de la gota y la altura de caída pueden dañar al cultivo.

2.3.3.5.3. Tipos de aspersores, por el número de boquillas

Según Cadena (2012), señala lo siguiente:

De una boquilla y dos boquillas, en estos las características hidráulicas se refieren a la boquilla de mayor diámetro que es la que acciona el mecanismo de giro. La forma y medida de las boquillas determinan la descarga, la forma de dispersión del agua y el tamaño de las gotas. Existen dos formas de boquillas ovalada que dispersa el agua a corta distancia y circular que lo hace a mayor distancia.

2.3.3.5.4. Tipos de aspersores, por la trayectoria o el ángulo de salida el chorro

Cadena (2012), señala los siguientes:

a) **Ángulo bajo:** cuando forman un ángulo igual o menor a 25º.

b) **Ángulo normal:** a la salida del chorro del agua se forma un ángulo comprendido entre 25 y 45º.

En aspersores para cultivos en campo abierto, la boquilla se conecta con un ángulo de 30º para alcanzar una distancia máxima, en los aspersores para riego sub-foliar, viveros, el ángulo puede ser de solamente de 4º que no permite daños al racimo de la fruta.

2.3.3.5.5. Criterios de selección del aspersor

Gaete (2001) señala, criterios de un método de riego: la selección del método de riego se basa en criterios que tienen relación con el cultivo, el suelo, topografía, el clima, labores vinculadas al desarrollo físico, manejo implica al mismo tiempo tomar decisiones con respecto al planteamiento integral del predio y grado de sistematización del terreno, a continuación se mencionan varios de los criterio de métodos de riego:

- **Velocidad básica de infiltración:** la intensidad de precipitación del aspersor, expresada en mm/h no debe superar la velocidad de básica de infiltración del suelo para evitar escorrentía.

- **El tamaño de la parcela:** en parcelas grandes se puede aplicar aspersores con un diámetro grande, mientras que en parcelas pequeñas se deben aplicar aspersores con diámetro mojados pequeños, que pueden adecuarse más fácilmente al área de la parcela; además de aplicar aspersores sectoriales que son ajustables para que irrigan solo el sector deseado de un círculo completo.

- **Tipo de cultivos:** si la parcela se dedica a hortalizas con rotaciones muy estrechas, será conveniente de un aspersor con diámetro pequeño (micro aspersores) para poder ajustar el riego a las necesidades de cada parte de la parcela.

- **Topografía:** si se tiene en cuenta la gran subdivisión al tratar los métodos de riego; el riego por superficie puede realizarse con relieve plano a ondulados; y el de aspersión en terrenos, desde llanos hasta fuertemente ondulados.

2.4. Contenido de agua en el suelo

Valverde (2007) señala que, la importancia del agua en el suelo y el rango de contenido de humedad, para el crecimiento de las plantas; de igual forma, algunas propiedades del suelo están directamente relación con esta variable: consistencia, compactibilidad, adherencia y trabajabilidad.

La capacidad del suelo para retener el agua contra la fuerza de la gravedad, permite que las plantas sobrevivan; los suelos pueden contener un poco de agua relativamente estable, mientras que, las raíces están en contacto constantes con ella, por lo tanto retienen mayor capacidad de almacenaje de agua, si no fuera por esto el agua drenaría rápidamente a través del suelo.

Hay varias características del suelo que definen su capacidad para retener el agua. Estos factores pueden ser identificados individualmente. Sin embargo, también deben considerarse en conjunto para tener una idea de la capacidad total de retención de agua del suelo; esta capacidad de retención esta influencia por la textura y el grado de compactación del suelo (Valverde, 2007).

2.4.1. Formas de expresar el contenido de agua en el suelo

Valarezo *et al* (1998) señala que, el contenido de agua del suelo se puede expresar en tres formas:

a) Contenido de agua en unidades de masa $(\boldsymbol{\theta_m})$

Corresponde a la relación entre la masa de agua (M_w) y la masa de sólidos del suelo (M_s)se tiene al relacionar el cociente entre la masa de agua presente en la muestra húmeda y la masa de ésta después de habido sido seca a 105º C por 24 horas; a lo que se conoce como contenido de agua gravimétrica.

Se expresa el contenido de agua en términos de fracción de unidad con la siguiente expresión:

$$\theta_m = \frac{masa\ de\ agua\ (M_w)}{masa\ de\ sólidos\ del\ suelo\ (M_{s)}};$$

De acuerdo a la fórmula anterior, para obtener en términos porcentuales, es necesario multiplicar por 100, y la expresión resulta:

$$\theta_m = \frac{(M_w)}{(M_{s)}} * 100;$$

De donde:

$\theta_m =$ Contenido de humedad en términos, (%)
$M_w =$ Masa de agua, (g)
$M_s =$ Masa del suelo, (g)

A partir de datos de laboratorio el contenido de agua gravimétrico se puede calcular así:

$$\theta_m = \frac{(PMH - PMS)}{PMS} * 100;$$

De donde:

$\theta_m =$ Contenido de humedad en términos de masa, (%)
$PMH =$ Peso de la muestra de húmeda, (g)
$PMS =$ Peso de la muestra seca a 105ºC durante 24 horas, (g)

El contenido de humedad en términos de masa puede ser mayor a 100 % en suelos altamente orgánicos o de origen volcánico, que retienen importantes cantidades de agua.

b) Contenido de agua en unidades de volumen ($\boldsymbol{\theta_{v)}}$

El contenido de humedad en unidades de volumen corresponde a la relación entre el volumen de agua V_w y el volumen total del suelo VT_s, se expresa mediante la siguiente relación en términos porcentuales:

$$\theta_v = \frac{(V_w)}{(VT_{s)}} * 100;$$

De donde:

$\theta_v =$ Contenido de humedad en términos de volumen, (%)
$V_w =$ Volumen de agua, (cm^3)
$V_{Ts} =$ Volumen total del suelo, (cm^3)

Para expresar el contenido de humedad del suelo resulta de mayor utilidad emplear el contenido de humedad en términos de volumen θ_v, que el contenido de humedad en términos de masa θ_m, debido a que se puede usar directamente en el cálculo de flujos y cantidades de agua agregadas al suelo por riego o por lluvia, y en el cálculo de las cantidad extraídas del suelo por evapotranspiración o drenaje.

Para transformar el contenido de humedad en términos de masa a términos de volumen, se requiere disponer del valor de la densidad aparente Da, se emplea la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{Da}{Dw} * \theta_m;$$

De donde:

$Da =$ Densidad aparente del suelo, (g/cm^3)
$Da =$ Densidad del agua, (g/cm^3)
$\theta_m =$ Contenido de humedad en términos de masa, (%).

Esto implica que el porcentaje de humedad por unidad de volumen de un suelo inalterado se puede encontrar, ya sea directamente a partir de una muestra recolectada en un cilindro de volumen conocido y directamente el contenido de agua, por secado y pesado; o indirectamente haciendo uso del valor del porcentaje de humedad en peso y la densidad aparente.

c) Contenido de agua en unidades lineales (mm)

Para aplicaciones de riego y drenaje, es conveniente expresar el contenido de humedad en términos de lámina. Esta lámina se define como el volumen de agua $\theta_{v,}$, que contiene el suelo

por unidad de área, hasta una profundidad especifica D, se expresa mediante la siguiente relación:

$$La_{mm} = \theta_v * D;$$

De donde:

$La_{mm} =$ Lámina de riego, (mm)

$\theta_v =$ Contenido de humedad en términos de volumen, (%)

$D =$ Profundidad de riego específica, (mm)

2.5. Energía del agua en el suelo

El movimiento del agua en el suelo está gobernado por las energías potencial y cinética; la energía cinética depende de la velocidad con que el agua se desplaza entre dos puntos ubicados en el perfil, debido a que el movimiento del agua en el suelo es muy lento, el valor de la energía cinética es muy pequeño por lo que, no se lo considera en el análisis de flujo, es entonces la energía potencial la que determina el estado energético y el movimiento del agua en el suelo (Ortiz, 2008).

La energía potencial del agua en el suelo varía en un amplio rango. Las diferencias en energía potencial, entre un punto y otro, determinan el flujo del agua dentro del suelo (Valarezo *et al.*, 1998)

2.5.1. Potencial del agua en el suelo

Valverde (2007) señala que, es de gran importancia conocer el estado energético del agua en el suelo, esto permite saber si el agua se encuentra en equilibrio o en movimiento. La energía potencial del agua se encuentra sometida a un conjunto de fuerzas definidas por la gravedad terrestre, depende de la atracción de la fase sólida (partículas de suelo), de su concentración de sales disueltas, materia orgánica, la temperatura, y por la interface agua- aire que ocurren en la porosidad.

La medición del potencial del agua se utiliza para determinar la dirección del flujo, el estado energético con que el agua es retenida por la matriz del suelo, la cantidad de energía que la planta tiene que ejercer para extraerla; y para determinar la lámina, el tiempo y la frecuencia de riego (Ortiz, 2008).

El potencial de agua del suelo se define como la diferencia de energía por la cantidad de unitaria de agua entre el estado de referencia y el punto de estudio; se analizan para condiciones de agua, temperatura, presión y condiciones diferentes (Ortiz, 2008).

El potencial del agua en el suelo está sujeta a varios potenciales que actúan sobe el sistema agua – suelo, y que, condiciona la retención de la misma y por ende su movimiento, además son

dinámicos, temporales y dependen de los potenciales de: gravedad, matricial, osmótico y presión, de tal manera se expresa el potencial con la siguiente fórmula:

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_p \ ;$$

De donde:

$\Psi_t =$ Potencial total del agua en el suelo
$\Psi_g =$ Potencial gravitacional
$\Psi_m =$ Potencial mátrico o de presión negativa
$\Psi_o =$ Potencial osmótico
$\Psi_p =$ Potencial de presión

En el manejo del agua de riego el valor absoluto del potencial, se lo denomina tensión o succión, por lo que las unidades de medida se pueden presentar en términos de masa (Julio/kg), volumen (bar) y peso (m.c.a) (Ortiz, 2008).

2.5.1.1. Potencial Gravitacional

El agua en el suelo es afectada por las fuerzas de gravedad que provocan su movimiento vertical y tiene influencia en todo el perfil del suelo; este potencial es mayor en suelos arenoso, lo que se pone de manifiesto por la forma alargada del bulbo húmedo que se crea por efecto del agua (Valverde, 2007).

Según Ortiz (2008), indica que el potencial es de signo postivo para todos los puntos ubicados sobre el nivel de referencia, y si este niviel conincide con la superficie del suelo; y el potencial gravitacional será de signo negativo para todos los puntos ubicados bajo la superficie. El flujo vertical, infiltración, percolación del agua, se produce hasta que el potencial gravitacional es balanceado por el potencial matricial (capilaridad) o hasta cuando la tensión de humedad del suelo alcance la capacidad de campo.

En los sistema de riego como: aspersión, goteo, y gravedad, el potencial gravitacional es la fuente principal para el movimeinto del agua, debido a los grandes volúmnes que se aplican a

cada riego. El resultado final de este potencial es la percolación profunda, que produce el ascenso gradual de la tabla freática en el riego por gravedad y aspersión; y, genera bulbos húmedos alargados o profundos en el riego por goteo.

2.5.1.2. Potencial Matricial

El potencial matricial está relacionado con las fuerzas de atracción del agua a la matriz del suelo y con las fuerzas de atracción entre moléculas de agua. En función del gradiente potencial, el agua se mueve de zonas húmedas (potencial alto o menos negativo) a zonas secas (potencial bajo a más negativo). El potencial matricial es negativo en la zona no saturada (suelos húmedos) y es nulo en la zona saturada o bajo el nivel de la tabla freática.

O también conocido como potencial capilar, es una medida de la fuerza con que el agua es retenida por el suelo y representa la fuerza por unidad de área que se debe aplicar para extraerla; el agua del suelo, es gobernada por las fuerzas de adhesión y cohesión. La fuerza de adhesión es la fuerza de atracción del suelo hacia las moléculas de agua (unión entre la fase sólida del suelo y la líquida); la cohesión es la atracción de las moléculas de agua entre sí (Valverde, 2007),

2.5.1.3. Potencial Osmótico

El potencial osmótico se refiere a las fuerzas de atracción electrostática entre sales y las moléculas de agua, es la energía que se necesita para extraer el agua desde los iones hidratados, es nulo en el agua pura; es directamente proporcional a la cantidad de sales que se suministran través del riego, y se determina por medio de sondas, bloques de yeso y por método del extracto de saturación (Ortiz, 2008).

Es el potencial osmótico es aquel provocado por la presencia de sales disueltas en el agua del suelo y que varía con el estado de humedad del mismo. Existe una relación estrecha entre el potencial osmótico, del extracto de saturación y su conductividad eléctrica, usada para determinar el nivel de concentración de sales (Valverde, 2007).

2.5.1.4. Potencial de presión o en suelos saturados

Este potencial está relacionado con el peso del agua y con la presión del aire que existe entre el punto de estudio y el nivel de referencia; se considera nulo en la zona saturada, aunque es de tipo temporal durante el flujo del agua en el riego por gravedad, y es positivo en la zona saturada, también se lo define como carga hidráulica; y se determina a través de piezómetros que son utilizados en el diseño de sistema de drenaje (Ortiz, 2008).

En un suelo saturado, el potencial matriz es 0, pues el agua se encuentra a una presión mayor a la atmosférica. Entonces, el potencial total estaría dado por el potencial de presión y el gravitacional (Valverde, 2007).

2.5.1.5. Aplicaciones en el riego

Para efectos de riego, los más importantes son el potencial mátrico o capilar y el gravitacional, que se utilizan en el estudio del flujo del agua, por lo tanto constituyen el potencial que actúa como fuerza motora; el potencial de presión es básico para efectos de drenaje. El osmótico es importante en la medida que haya sales disueltas en el agua del suelo en tal cantidad (salinidad), que limiten la absorción de agua por la raíces (Valverde, 2007),

2.5.2. Curva de retención del agua del suelo

Parte del siguiente principio, el cual dice, que cada vez que disminuye el contenido de agua en el suelo, aumenta exponencialmente el trabajo necesario para extraer una cantidad adicional de agua. El trabajo que se requiere ejercer, para extraer el agua del suelo será numéricamente igual, pero de signo opuesto al potencial de agua en el suelo.

Se conoce con el nombre de curva de retención de agua en el suelo o curva característica de la humedad del suelo; después de someter una muestra de suelo, al ser aplicada a diferentes cargas de presión, a este trabajo se le conoce con el nombre de succión de humedad del suelo o tensión de humedad (Valarezo et al., 1998).

La curva se construye a partir de la medición del contenido de humedad para varios niveles de tensión, a través del desecamiento de una muestra de suelo, después de haber sido totalmente

saturada. La curva tensión – humedad permite conocer el estado energético del agua en el suelo y la energía que las plantas tienen que ejercer para extraer el agua; así como cuando y cuanto regar (Ortiz, 2008)

Debido a que a la energía (trabajo), necesaria para extraer el agua del suelo aumenta exponencialmente, mientas que el contenido de agua disminuye linealmente, para facilidad en la gráfica se utiliza el logaritmo de la tensión de humedad del suelo expresado en cm de columna de agua que se conoce con el nombre de pF (p = potencial, F = energía libre).

La pendiente de la curva de retención de agua del suelo, que es el cambio de potencial mátrico, por unidad de cambio del contenido de agua, se la conoce con el nombre de característica del agua del suelo, o capacidad diferencial de agua C; esta propiedad es importante en relación con el almacenamiento y la disponibilidad de agua para las plantas, y se expresa de la siguiente manera:

$$C = \frac{\mathrm{d}\,\Psi}{d\theta};$$

De donde:

$C =$ Capacidad diferencial de agua
$\mathrm{d}\,\Psi =$ Diferencial potencial matricial
$\mathrm{d}\,\theta =$ Diferencial contenido de humedad

2.5.2.1. Factores que determinan la forma de curva de retención de agua en el suelo

Valarezo *et al* (1998) señala que, los factores que determinan la forma de la curva de retención de agua del suelo son; la textura, estructura y la materia orgánica.

La cantidad de agua retenida a valores relativamente bajos de succión mátrica (0 bar y 1 bar), depende primeramente del efecto capilar y de la distribución del tamaño de los poros; en consecuencia, es fuertemente afectada por estructura del suelo. Por otro lado, la retención de agua del suelo en el rango más alto de succión en forma creciente se debe a la adsorción, siendo

por consiguiente, menos afectada por la estructura pero más por la textura, es decir por la superficie especifica del material del suelo.

2.5.2.2. Aplicaciones de la curva de retención

- ✓ Permiten determinar la capacidad de aireación del suelo para las raíces y el espacio poroso drenable.
- ✓ Conocer el volumen total de poros y la distribución de los poros por rangos de tamaño.
- ✓ Rango de agua aprovechable para las plantas y el volumen rápidamente aprovechable.
- ✓ Determinar el espacio poroso físicamente inerte.
- ✓ Evaluar las condiciones físicas del suelo, como medio de crecimiento de las plantas.
- ✓ Diseño de proyectos de riego y drenaje.
- ✓ Conservación de suelos y aguas.

Los puntos más importantes de la curva de pF, en las cual se encuentran las constantes hidrofísicas del suelo dependen fundamentalmente de la textura, cantidad de materia orgánica y del grado de compactación (Leitón, 1985); además son un requisito esencial en el diseño y planificación de riego, con el propósito de conocer la disponibilidad de agua en el suelo, es necesario establecer límites de contenido de humedad los que son definidos por la textura y conocidos como coeficientes o parámetros hídricos (Valverde, 2007).

A continuación se describen los parámetros más importantes:

a) Saturación del suelo ($\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{sat}}$)

Se refiere al contenido de humedad del suelo cuando está saturada, en esta condición la porosidad se encuentra ocupada por el agua; la porosidad total del suelo es igual al contenido de humedad en términos de volumen para el punto de saturación, siendo la máxima capacidad de retención de humedad, y se encuentra retenida a una tensión de 00 Kpa o (pF = 0), (Valarezo *et al*., 1998).

b) Capacidad de campo ($\boldsymbol{\theta_{cc}}$)

Corresponde al contenido de humedad cuando la tensión varía entre: (-10 Kpa a – 30 Kpa) o (pF =2 a 2,52), se inicia cuando el potencial matricial se ha equilibrado con el potencial gravitacional, teóricamente representada la mayor cantidad de agua en el suelo, que pude retener contra la gravedad, hasta llegar a un punto, en que el agua del suelo drena libremente (drena el exceso de agua luego de 2 a 3 días en la mayor parte de los suelos, tras una lluvia o aplicación del riego), y se estabiliza, cuando alcanza este punto se dice que el suelo está a capacidad de campo, los microporos están llenos con agua (Leitón, 1985).

c) Capacidad de aireación o porosidad drenable ($\mathbf{C}_{\boldsymbol{a}}$)

Se obtiene de la diferencia del contenido de humedad a saturación y el contenido de humedad a capacidad de campo (Valarezo *et al*., 1998).

d) Punto de marchitez permanente ($\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{PMP}}$)

Es el contenido mínimo de humedad del suelo, al que la planta se marchita en forma irreversible ya no puede absorber agua con facilidad, causando deficiencia hídrica y no recupera su turbidez. Se encuentra retenida a una fuerza de succión de 1500 Kpa o (pF = 4,2) (Leitón, 1985).

e) Coeficiente higroscópico ($\boldsymbol{\theta_{ch}}$)

Corresponde al contenido de humedad del suelo cuando ha alcanzado el equilibrio bajo ciertas condiciones: 98 % de humedad relativa, una atmosfera de presión, y a la temperatura ambiente. Se encuentra retenida con una fuerza de succión de 3 100 Kpa o (pF = 4,40) (Valarezo *et al*., 1998).

f) Agua útil o agua aprovechable ($\boldsymbol{AA}$)

Es la cantidad de agua almacenada por el suelo después de un periodo de lluvias o de riego, y se encuentra entre el límite de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. En esta

situación es muy favorable para las plantas, ya que es fácil la absorción radicular, realizando poca energía para extraer el agua del suelo (Valverde, 2007).

g) Volumen físicamente inerte del suelo ($\boldsymbol{VFI}$)

Es igual al volumen de sólidos más el volumen inútil de los poros, este volumen corresponde al valor de contenido volumétrico de agua a punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), comprende a aquellos poros menores de a 0,2 micras, que no proveen ni aire ni agua a las raíces (Valarezo et al., 1998).

2.5.2.2.1. Evaluación de las condiciones físicas del suelo

Valarezo et al. (1998) señala que, las distribución de los volúmenes de las tres fases el suelo; sólida, liquida y gaseosa, a capacidad de campo, sirve para determinar la condición física del suelo con relación al crecimiento de las plantas. Se puede clasificar mediante el diagrama triangular que se presenta en la siguiente figura 1.

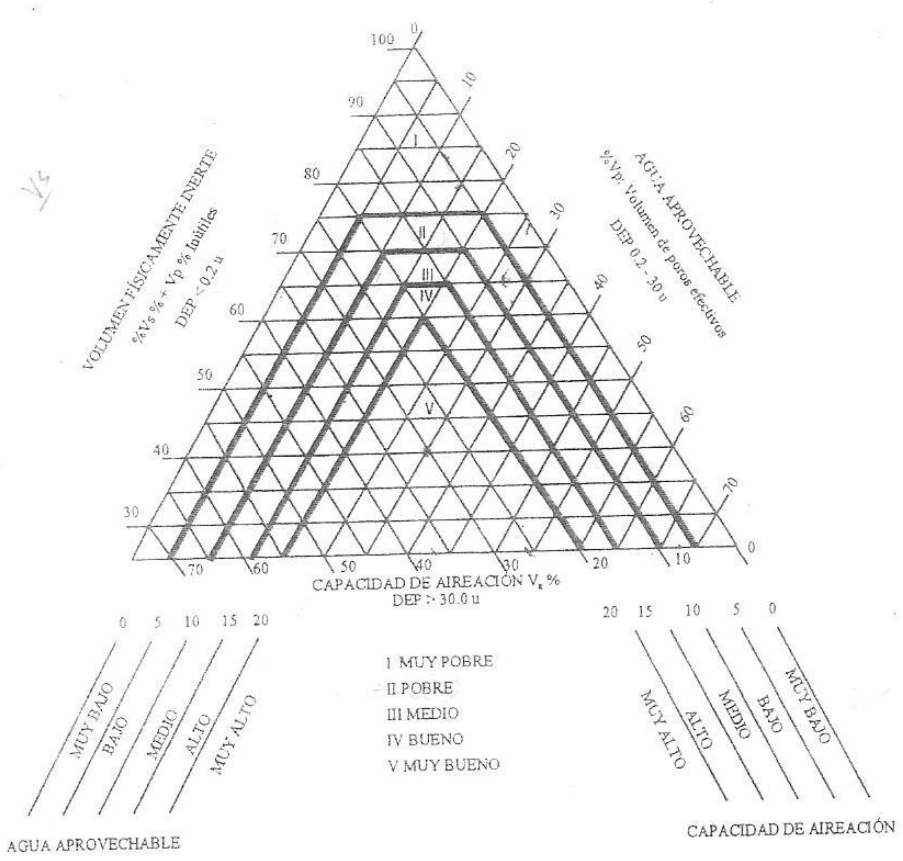


Figura 1. Diagrama triangular para la evaluación de las condiciones físicas del suelo
Fuente: (Valarezo, et al., 1998).

2.6. Infiltración del agua en el suelo

La infiltración es una propiedad física muy importante en la relación con el manejo del agua de riego en los suelos. Se refiere a la velocidad de entrada del agua en el suelo. La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo; y permite seleccionar el método de riego que conviene implementar, se expresa generalmente en cm/h, cm/min, mm/h o mm/min.

La cantidad de agua que se infiltra en un suelo en una unidad de tiempo, bajo condiciones de campo, es la máxima al comenzar la aplicación del agua en el suelo y disminuye conforme aumenta la cantidad de agua que ya ha entrado en el suelo (Cisneros, 2003).

Según Cisneros (2003)**,** señala los factores que afectan la infiltración del agua en el suelo:

2.6.1. Factores que afectan la infiltración

Sellamiento superficial: La formación de una fina y compacta capa sobre la superficie del suelo, afecta negativamente la infiltración, al reducir rápidamente la penetración de agua a través de la superficie.

Compactación del suelo: El laboreo del suelo con implementos, facilita la infiltración. Sin embargo araduras y pases de rastra permanentes hasta una profundidad similar en suelos húmedos con ciertas características de textura, pueden producir una compactación y formación de una capa impermeable denominada “pie de arado”, que afecta negativamente la infiltración.

Sales del suelo y agua: Las sales que puede contener el agua de riego se van acumulando en el perfil del suelo; algunas pueden ser benéficas al cultivo, sin embargo hay otras como el sodio que altera la estructura del suelo y tiene un efecto negativo sobre la infiltración.

Sedimentos en el agua de riego: En algunos lugares las partículas de limo y arcilla que se mantienen en suspensión en el agua de riego, provocan un encostramiento el cual disminuye en forma notoria la infiltración del agua.

Materia orgánica y rotación de cultivos: La materia orgánica mantiene la porosidad del suelo durante períodos largos, dependiendo del estado de descomposición en que se encuentre. Esto hace que la velocidad de infiltración no se altere y, más aún, que aumente.

Textura del suelo: La textura o combinación de partículas de arena, limo y arcilla tienen gran impacto en las características del suelo con respecto a la infiltración. Texturas más gruesas, la infiltración será más rápida y texturas más finas tendrán infiltración más lenta.

2.6.2. Ecuaciones empíricas de la velocidad del agua en el suelo

Existen varias fórmulas que pretenden expresar matemáticamente el fenómeno de infiltración; entre la más generalizada y utilizada, cuyos parámetro se deducen en base a datos experimentales, es la denominada fórmula de Koastiakov (1932, Rusia). Esta ecuación es usada en trabajos de riego debido a su simplicidad y se ajusta razonablemente bien a periodos de tiempo que no exceden unas pocas horas, que lo que se necesita para riego (Negro, 1988).

Maldonado (2012), cita las siguientes ecuaciones:

a) Velocidad de infiltración $(\boldsymbol{VI})$

Es la velocidad de infiltración, es el proceso mediante el cual el agua penetra en el interior del suelo en un tiempo determinado. Koastiakov (1932), encontró una expresión matemática que relaciona la lámina de agua infiltrada con el tiempo en que se infiltra dicha lámina. La ecuación planteada por Koastiakov, que expresó la infiltración en un punto.

$$VI = a * t^b;$$

De donde:

$VI =$ La velocidad de infiltración o infiltración instantánea, (mm/h, mm/min)
$a =$ Coeficiente que representa la velocidad de infiltración en un tiempo igual a 1 minuto, (min)
$t =$ Tiempo de infiltración que viene dado en horas, (h)

$b =$ Coeficiente, que representa a un exponente sin dimensión, siempre es negativo y con valor que, van de (0 a -1 para suelos agrícolas).

b) Infiltración acumulada, ($Icum$)

La sumatoria de las alturas de agua infiltradas durante el tiempo de infiltración se conoce como infiltración acumulada. Según esta definición, la ecuación de $Icum$ se obtiene integrando la VI, entre los límites $t = 0$ y $t = t$, se obtiene la infiltración acumulada.

Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Icum = \int_0^t VI = \frac{a}{(b+1)} * t^{(b+1)}$$

$$Haciendo\ A = \frac{a}{(b+1)}; B = b + 1$$

De donde:

$$Icum = A * t^b$$

$Icum =$ Infiltración acumulada en un tiempo t, mm

$t =$ Tiempo, min

Los parámetros a y b o A y B de la ecuación de infiltración pueden obtenerse:

- Analíticamente por el método de mínimos cuadrados.

- Gráficamente representando las mediciones de campo en un papel doble logarítmico o graficado en la hoja de cálculo del software Excel.

Obteniendo la ecuación de infiltración, es posible despejar el tiempo necesario para que se infiltre la lámina neta de riego.

c) Infiltración promedio, ($\boldsymbol{Ip}$)

La velocidad de infiltración promedio relaciona la $Icum$ y el tiempo trascurrido desde que comenzó la infiltración.

d) Velocidad de infiltración básica ($\boldsymbol{VIb}$)

Según el Soil Conservation Service (SCS) de los EE.UU, la VIb, corresponde al valor en que la variación de la velocidad de infiltración respecto al tiempo es menor o igual que el 10% de su valor, es decir corresponde al valor en que la variación de la VI, respecto al tiempo es prácticamente despreciable.

Con fines de diseño es preferible trazar la VI, y encontrar VIb, en aquel punto de la curva, cuando la pendiente m de la tangente a dicho punto sea menor o igual al 10% (punto de inflexión).
Analíticamente, el tiempo al que se logra la VIb, se encuentra igualando la derivada de la ecuación VI con el 10% de la misma ecuación, es decir la infiltración se mantiene constante, a partir de cierto periodo.

Resulta mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dVI}{dt} = -0.1 * VI$$

Despejando el tiempo básico se expresa como:

$t_{base} = -600\ b$, Tiempo en minutos

Reemplazando el tiempo infiltración por el tiempo base en la ecuación $VI = a * t^b$, se obtiene la velocidad de infiltración básica:

$VIb = a * (-600 * b)^b$, mm/hr; $\mathrm{t} = \min$

El concepto de VIb y su respectivo valor son muy importantes en la selección de aspersores, microaspersores goteros y otros elementos de emisión del riego presurizado. Se considera el criterio de VIb del suelo debe ser menor o igual a la intensidad de precipitación del equipo de riego seleccionado. $VIb \leq I_P$.

Para facilitar la interpretación de los datos medidos de infiltración, el ILRI (1965), presenta los siguientes valores referenciales.

Cuadro 1. Clasificación de la infiltración básica

Clasificación	**VIb, mm/h**
Muy baja	< 2,5
Baja	2,5 a 1,5
Media	15 a 28
Alta	28 a 53
Muy alta	53

2.7. Diseño agronómico

El diseño agronómico consiste en determinar las necesidades hídricas del cultivo, es decir se calcula la cantidad de agua que necesita el cultivo para su normal desarrollo, sin ocasionar un déficit hídrico, dependiendo primordialmente de factores edafológicos y climatológicos básicamente y otros propios del cultivo. El diseño agronómico se desarrolla en dos fases: Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos y determinación de los parámetros de riego (agua en el suelo**)** (Tarjuelo, 1991)**.**

2.7.1. Necesidades de agua del cultivo

Es la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo mediante la aplicación de riego.

2.7.1.1. Evapotranspiración

Se le conoce como evapotranspiración a la combinación de dos procesos, separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Cisneros, 2003).

a) Evaporación

La evaporación es el agua pérdida en forma de vapor por el terreno adyacente a la planta, por la superficie del suelo o por la superficie de las hojas de las plantas. El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La evaporación está en función de la radiación solar, temperatura del aire, latitud, humedad atmosférica, velocidad del viento, estación del año, hora del día y nubosidad, siendo parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación (Cisneros, 2003).

b) Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. El contenido de agua en el suelo y la capacidad del suelo, de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración. La transpiración está en función de factores climáticos: viento, humedad atmosférica, temperatura del aire, del gradiente de presión y radiación solar. Deben ser considerados en su determinación (Cisneros, 2003).

2.7.1.2. Evapotranspiración de referencia (Et_o)

Los efectos de clima sobre los requerimientos de agua del cultivo vienen reflejado por la Et_o evapotranspiración del cultivo de referencia bajo condiciones estándar. Este término se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo (FAO 56, 2006).

El cual hace referencia a un cultivo de referencia: "Extensa pradera de gramíneas en crecimiento activo, de altura uniforme entre 8 y 15 cm, que sombrea completamente el suelo, libre de plagas y enfermedades y nunca escasa de agua y de nutrientes". Se pueden comparar valores medidos o estimados de Et_o, en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a Et_o bajo el mismo cultivo de referencia. Doorenbos y Pruit, 1976 (citado por FAO 56, 2006).

2.7.1.3. Coeficiente del cultivo

Se conoce como coeficiente del cultivo K_c, un valor dependiente de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de la planta. El kc varía según el periodo de crecimiento de la planta hasta un máximo, que se produce en la época de mayor desarrollo del cultivo y luego decrece en las etapas de maduración. (Valverde, 2007).

Maldonado (2012) señala que, las etapas de crecimiento del cultivo son:
A medida que el cultivo se desarrolla, tanto en área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar varían progresivamente y lo que hace es cambiar el valor de

Kc en las diferentes fases de desarrollo del cultivo, como se muestra en la figura 2, en las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, luego con ello desarrollo del cultivo proyecta más sombra sobre el suelo, y finalmente lo cubre totalmente, la transpiración se convierte en el proceso principal.

Para el cálculo del Et_c el valor de Kc debe modificarse según el estado de desarrollo de las plantas, conforme se muestra en la figura 2; se consideran tres valores básicos de coeficiente de cultivo, que orientan las modificaciones de Kc, los cuales, se denominan: $kc_{ini}, kc_{med}\ y\ kc_{fin}$,, correspondientes a los puntos de cambio del estado de desarrollo y cuyas descripciones se presentan a continuación:

Fase inicial: $\boldsymbol{kc_{ini}}$, comprende el periodo de germinación y crecimiento inicial, se estima que esta va desde la siembre hasta el 10% de cobertura del suelo.

Fase de desarrollo: también conocida como fase de crecimiento, va desde el final de la fase inicial, hasta que completa el periodo de desarrollo, es decir desde el 10% hasta el 80% de cobertura vegetal.

Fase de medios del periodo: $\boldsymbol{kc_{med}}$, denominada también fase de maduración, comprende desde que se logra el 80% de cobertura, hasta comienzos de la maduración. En algunos cultivos, en esta fase puede iniciarse con la floración. El coeficiente kc alcanza su valor máximo.

Fases de finales del periodo o fase de cosecha: $\boldsymbol{kc_{fin}}$, va desde comienzos de la maduración hasta la cosecha total (maduración plena).

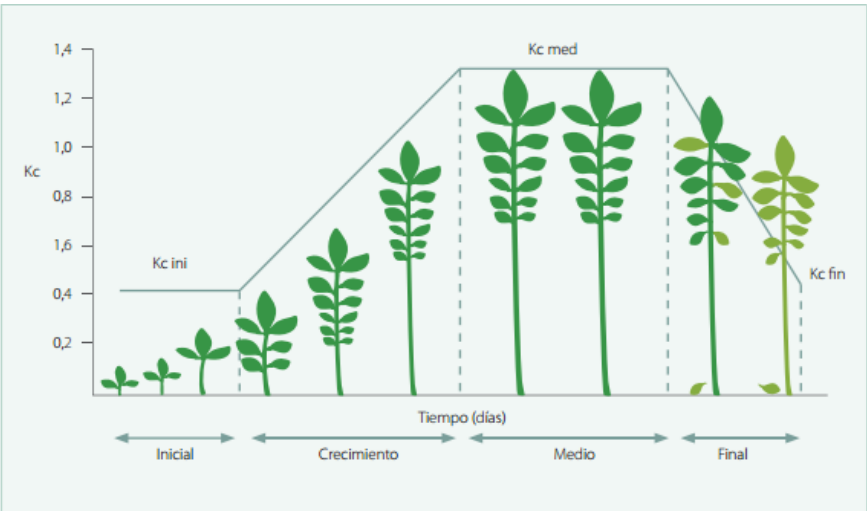


Figura 2. Variación del coeficiente kc del cultivo, según el desarrollo de la planta

En la figura 2, se muestra, la forma de curva, que representa los cambios de la vegetación y el grado de cobertura del suelo durante el desarrollo de la planta y la maduración.

2.7.1.4. Evapotranspiración del cultivo (Et_C)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar Et_C, se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Se considera bajo condiciones de campo, como se presenta en la figura 3.

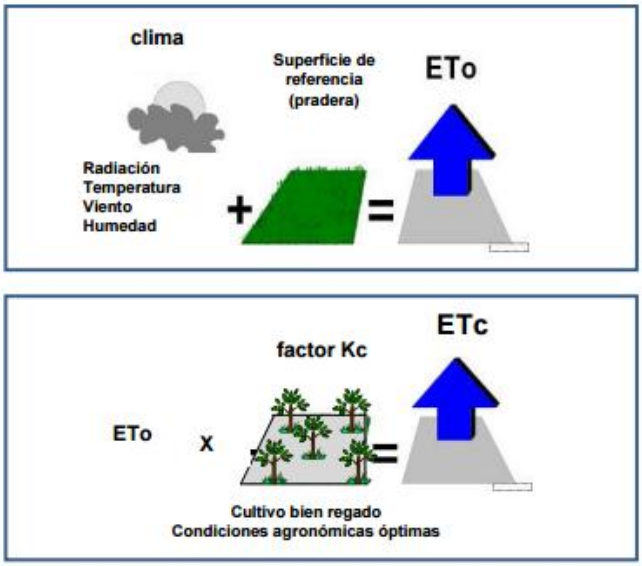


Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia, y la determinación de la Etc del cultivo

Según FAO 56 (2006), señala lo siguiente:

La Et_C es la evapotranspiración real del cultivo presenta las condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de Et_0. Es la cantidad de humedad necearía para satisfacer la evapotranspiración real y la formación de tejidos, propios de las plantas.

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar se calcula utilizando un coeficiente de cultivo de estrés hídrico Kc a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo.

La Et_C se obtiene al multiplicar la evapotranspiración referencial del cultivo por el coeficiente del cultivo $Et_o \ * k_C$.

a) Métodos para determinar la evapotranspiración de referencia:

Existen varias fórmulas para estimar la evapotranspiración de referencia $\boldsymbol{Et_O}$ a partir de métodos directos e indirectos:

Métodos directos:

Los principales métodos directos son: tanques y lisímetros, parcelas experimentales, estudios sobre la humedad del suelo, método de integración, método de entradas y salidas de agua para grandes extensiones; se basan en la medición directa sobre el terreno de agua eliminada por el suelo a partir del momento en que alcanza su capacidad de campo, entre los principales se tiene:

- Un método usado comúnmente para conocer la evaporación es el del tanque tipo “A”, por demás sencillo y fácil de manejar por el usuario y en donde se asume que existe relación entre la evaporación del tanque y el consumo por la planta. Las características del tanque tipo “A” son las siguiente: diámetro 121,9 cm; altura 25,4 cm; espesor de la lámina de 17,5

y 20 cm. El tanque se construye de hierro galvanizado y para realizar las lecturas diarias se utiliza una escala graduada en milímetros (Cisneros, 2003).

- Cisneros (2003) señala el método del lisimétrico, consiste en estima la evapotranspiración de referencia, por procedimiento de medición de pérdidas de agua, en recipientes que se llenan del suelo y se siembran con el cultivo en cuestión; se clasifican de la siguiente manera:

  Según finalidad: agronómicos, hidrológicos e hidrogeológicos.
  Según estado del suelo: alterada o inalterada (monolíticos)
  Según sistema de medición: de drenaje, de pesada (mecánicos, hidráulicos o electrónicos).
  Según colocación: superficiales (agrícolas e hidrológicos) y subterráneos (hidrogeológicos).
  Según su localización: de campo o de invernadero.

Métodos indirectos:

Se considera variables meteorológicas, por lo tanto la denominada evapotranspiración de referencia viene a representar un índice climático asociado al área de estudio, lo que hace útil para la evaluación de las condiciones de humedad de un área determinada, en equilibrio con su clima, entre los principales métodos de estimación se tiene:

- **Método FAO Penman - Monteith** se recomienda como el único método de determinación de Et_O con parámetros climáticos, es el más utilizado debido a que se aproxima de una manera cercana a la Et_O de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos; requiere de datos meteorológicos: radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (FAO 56, 2006).

- En el presente trabajo se determinó la (Et_O), con **el método indirecto de Thorthwaite**, el cual se basó en los valores de temperatura y en la altitud de un lugar de interés. Sirve para estimar la evapotranspiración referencial del cultivo; tiene la ventaja de que la fórmula usa datos climáticos accesibles (temperaturas medias mensuales); se obtienen buenos resultados

en zonas húmedas con vegetación abundante, pero los errores aumentan en zonas áridas o semiáridas (Cadena, 2012).

- **Método de Christiansen,** considera datos de temperatura, humedad atmosférica, velocidad del viento y heliofanía (eventualmente de nubosidad), y proporciona resultados muy satisfactorios para predecir los efectos del clima sobre las necesidades de agua de los cultivos (Maldonado, 2001).

- **Método de Turc,** este se basa en la temperatura media mensual y la radiación global (horas brillo solar o heliofanía). Funciona bien para climas temperados y fríos (Maldonado, 2001).

2.7.2. Demandas de riego

Al hablar de demanda de agua de riego se considera: la evapotranspiración máxima del cultivo, selección del método de riego (eficiencia de aplicación) y el caudal disponible. De acuerdo a ello se determinan los caudales para el manejo práctico del agua de riego; considerando el concepto de riego integral: que es aquél que se emplea cuando en un área dada la contribución del agua de lluvia presenta un déficit significativo, y el aporte del mismo al proceso evapotranspiratorio es de escasa magnitud, de manera que puede despreciarse (Grassi J, 1998).

2.7.2.1. Caudal continuo

Caudal continuo q_c es el caudal que debe entregarse en forma continua para satisfacer la necesidad de agua del cultivo en su máxima demanda por una unidad de superficie, durante un día y se tiene la siguiente unidad de medida (l/s/ha) (Ing. Marco Reinoso, comunicación personal).

2.7.2.2. Caudal permanente

Caudal permanente o disponible q_p corresponde al caudal en la fuente de agua, que permite calcular la superficie de suelo a regar, está en función de la máxima demanda del cultivo. Se determina la superficie de riego al relacionar: el caudal disponible y el caudal continuo (Ing. Marco Reinoso, comunicación personal).

2.7.2.3. Caudal de diseño

El caudal de diseño Q_d, sirve para obtener el caudal de todo el sistema de riego y diseñar la red hidráulica, especialmente la tubería principal; también se lo puede considerar en la selección del aspersor de riego y determinar el volumen del reservorio.

El caudal de diseño relaciona, el caudal disponible q_d, con el factor de operación F_o, está determinado por el manejo que se da al sistema de riego, es decir, frecuencia de riego F_r, ciclo de riego C_r y el tiempo de aplicación (Ing. Marco Reinoso, comunicación personal).

2.7.3. Parámetros de riego

Se puede definir en forma adecuada las láminas de riego y los intervalos de aplicación entre dos riegos consecutivos.

2.7.3.1. Láminas de riego

Según Cadena (2012) señala que, se puede definir como la cantidad de agua que es necesario dar en un riego para elevar el contenido de humedad de la zona radicular, desde un valor inferior correspondiente a fracción de agotamiento, hasta un valor superior que coincide con la capacidad de campo, a continuación se presenta las siguientes láminas de riego:

- ✓ **Lámina de agua aprovechable** ($\boldsymbol{LAA}$)

Permite calcular la cantidad de agua expresada en lámina que un suelo a cierta profundidad, es capaz de almacenar, el cual considera el agua aprovechable y la densidad aparente. Es uno de los valores más importantes en el cálculo de la programación del riego denominado (LAA) o agua disponible en el perfil el suelo para uso consuntivo de las plantas (Maldonado, 2012).

- ✓ **Lámina de agua rápidamente aprovechable** ($\boldsymbol{LARA}$)

Es la cantidad de agua consumida por la planta entre dos riegos consecutivos, siendo la cantidad de agua que se debe aplicar en cada riego por unidad de superficie. Se obtiene del producto de $LAA * UR$.

El UR umbral de riego es el porcentaje que permite el descenso de la lámina de agua aprovechable, sin causar stress al cultivo, ni la dificultad de realizar mayor esfuerzo por las raíces, mismo que afectaría el normal desarrollo del cultivo. Para pastos el UR es de aproximadamente del 60%, depende de la sensibilidad del cultivo al déficit de humedad (Maldonado, 2012).

- ✓ **Lámina de riego o lámina total** (L_r)

Es la cantidad total de agua que se entrega por riego a la superficie del terreno, de manera que asegure la suficiente entrega de agua, está en función de la eficiencia de aplicación del método de riego a utilizarse (Maldonado, 2012).

2.7.3.2. Frecuencia de riego

Se relaciona la lámina de agua rápidamente aprovechable con la demanda máxima de cultivo, se obtiene la frecuencia de riego calculada. Esta frecuencia de riego es el número de días que transcurren entre dos riegos sucesivos (Tarjuelo, 1991).

- ✓ **Frecuencia de riego ajustado**

Se presenta en el momento en que, la frecuencia de riego es muy amplia entre el número de días que trascurre para el próximo riego, esta necesita mayor cantidad de agua en aplicar a la superficie de riego calculada, y más aún cuando no se dispone de suficiente caudal para abastecer al caudal de diseño del sistema, que viene dado por el factor de operación del manejo de riego, lo que con lleva a la necesidad de optar por una obra de almacenamiento; por lo tanto es necesario en reajustar dicha frecuencia a un intervalo de días menor para un óptimo manejo practico del agua de riego (El autor).

2.7.4. Elección del aspersor

Gaete (2001) manifiesta que, pueden existir infinitas variables en la elección de los tipo de aspersores, por lo que se recomienda; elegir un tipo de emisor que cumpla con todos los requerimiento del cultivo, clima, factor económico, entre otros y en el caso de existir más de un emisor favorable, elegir el de menor costo conservando la calidad del material.

Para un mismo caso, se puede elegir entre emisores que entreguen un bajo caudal individual, siendo la sumatoria de sus caudales satisfactoria para el abastecimiento de agua, o un emisor que entregue el caudal de todos.

Gaete (2001) manifiesta los siguientes conceptos para el cálculo del aspersor:

2.7.4.1. Intensidad de precipitación I_P

Es la cantidad de agua provista a una unidad de superficie en mm/h, que puede entregar el aspersor durante el riego sin provocar erosión o encharcamientos en el suelo, por ello la condición de diseño deber es $I_P \leq$ VIb; se debe tener cuidado en escoger emisores que entreguen una precipitación adecuada que no provoque daños durante el riego. La intensidad de precipitación depende de las características del aspersor, diámetro de boquillas y la presión de trabajo.

Para el calculo, se considera el caudal de operación del aspersor,y el espaciamiento entre aspersores, determinado por la disposición del marco de riego en el terreno.

2.7.4.2. Número de posiciones

Es la relación entre la superficie de riego y el marco de espaciamiento entre aspersores y laterales de riego.

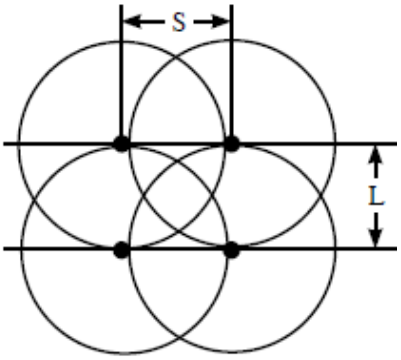
2.7.4.3. Tiempo de riego por posición del aspersor

La duración de riego en cada una de las posturas, se determina mediante la relación de la lámina de riego (mm) y la intensidad de precipitación del aspersor (mm/h).

2.7.4.4. Marco de riego

Según Gaete (2001), los aspersores se distribuyen en el terreno de modo que el sistema pueda operar en forma eficiente y económica. En la distribución incluye la forma y dimensiones del terreno. Con el objeto de tener una buena uniformidad del riego, debe existir traslape de mojamiento entre aspersores, por lo que la distribución en cuadrado es las más utilizada en los sistemas semi fijo y móviles, el 60% del diámetro efectivo del aspersor, para marcos en cuadrado o en triángulo.

El distanciamiento entre aspersores es uno de los aspectos fundamentales del diseño, se recomienda los siguientes porcentajes de separaciones entre S aspersores y L laterales, en función de la velocidad del viento a continuación se presenta en la figura 4.



Tasas Máximas de Precipitación para Terreno Plano

Suelos	mm/hr
Arenosos Gruesos	19.0 mm - 25.4 mm/hr
Arenosos Finos	12.7 mm - 19.0 mm/hr
Franco Arenosos Finos	8.9 mm - 12.7 mm/hr
Franco Limosos	6.3 mm - 10.2 mm/hr
Franco Arcillosos	2.5 mm - 7.6 mm/hr

Espaciamiento Máximo entre Aspersores

Velocidad de Viento	Espaciamiento
8 kph o menos	60% del diámetro de mojado
8-16 kph	50% del diámetro de mojado
más de 16 kph	25-30% del diámetro de mojado

Figura 4. Disposición entre aspersores, en función de la velocidad del viento

Fuente: Catálogo de riego Senninger Irrigation Inc 2010

Según Cadena (2012) señala: el aspersor no distribuye el agua de manera uniforme sino que varían a lo largo del alcance de este; recibiendo más agua en la zona próxima al aspersor, y disminuyendo conforme aumenta la distancia; por lo que es preciso sobreponer una parte de las áreas regadas por aspersores consecutivos en busca de una buena uniformidad, ante lo cual se ha dado criterios entre investigadores, al igual que las casas comerciales no han llegado a ponerse de acuerdo en cuál es la separación adecuada.

Los marcos de espaciamiento se pueden considerar las siguientes alternativas:

a) **Por la velocidad del viento**: tal como se presenta en la figura 4, por lo que el espaciamiento entre aspersores y laterales, se selecciona el porcentaje de espaciamiento de acuerdo al viento, este se multiplica por del diámetro efectivo del aspersor, correspondiente al traslape de mojamiento entre aspersores y al marco de riego.

Según Anten & Willet (2000) recomienda, una adecuada selección de los aspersores cuando los vientos son fuertes:

- Boquillas con diámetro mayor de (# 24) y ángulo pequeño (≤ 20º).
- Selección de la altura del elevador (lo más bajo posible).
- Distanciamiento entre aspersores más pequeños
- Instalación de barreras de viento.
- Colocar las laterales de manera que se forman ángulo de entre 45º a 90º con respeto a los vientos predominantes.

b) **Cuando el área de trabajo no tiene problemas de viento:** a lo cual Cadena (2012) considera, lo siguiente:

Se toma en cuenta el radio (r) del aspersor:

- Distribución en cuadrado se multiplica por un factor igual a 1,4 (r).
- Distribución en rectángulo 1(r) entre aspersores y 1,2 (r) entre laterales.
- Distribución triangular 1,7 (r) entre aspersores y 1,5 (r) entre laterales.

c) **Tomando en cuenta el diámetro del aspersor:** cuando se tiene disposiciones cuadradas o triangulares se multiplica por 0,7.

Heerman y Kohl (citado por Vega, 2010) señalan que:

- Valores desde el 60% del diámetro efectivo del aspersor para marcos cuadrado o en triángulo; cuando es rectangular el 75% entre laterales y el 40% del diámetro mojado entre aspersores.

- El diámetro efectivo es: 95% del ∅ mojado (2 boquillas) y 90% del ∅ mojado (1 boquilla).

Según Vega (2010) señala:

d) Disposición de los aspersores:

La distribución o cuadrillaje en la superficie a regar, está en función de sus medidas de largo y ancho y aun cuando el objetivo es obtener un número entero de líneas laterales con un número igual de aspersores, en la práctica con superficies irregulares esto no se puede dar y se queda una parte sin regar. Por ello se determina el solape entre los círculos mojados por los aspersores contiguos para logara una buena uniformidad de reparto de agua; se presenta las siguientes disposiciones de aspersores:

Disposición en cuadrado:

Los aspersores ocupan los vértices de un cuadrado, siendo en consecuencia, la distancia entre los laterales igual a la distancia entre los aspersores. Los marcos más utilizados son:

- Marcos de riego: (12x12) m; (18x18) m, recomendada para sistemas semifijo y móviles.

Disposición en rectángulo:

Los aspersores ocupan los vértices de un rectángulo, siendo la mayor distancia la separación de los laterales, los marcos más utilizados son:

- Marcos de riego: (12 x 12) m; (12 x 15) m; (15 x 15) m; (12 x 18); (18 x 18) m.

Disposición en triángulo:

Los aspersores ocupan los vértices de una red de triángulos equiláteros. Con estás disposición se necesita menor número de aspersores, se utiliza cuando se tiene un sistema fijo, permanente, los marcos más utilizados son**:**

- Marcos de riego: (18 x 15) m; (21 x 18) m.

e) Ventajas de la disposición de los aspersores:

Según Vega (2010) anota:

- Los espaciamientos pequeños presentan como ventajas un riego más uniforme y una menor presión de trabajo, pero tienen el inconveniente de un mayor costo del equipo.
- Las tendencias actuales son grandes marcos, con el fin de disminuir el material necesario, el costo y la mano de obra.

- Es mejor utilizar aspersores de dos boquillas que de una, con vaina prolongadora en la boquilla grande para vientos > 2 m/s.

- Marcos rectangulares (12 x 18) m con aspersores de una boquilla, se recomienda el menor espaciamiento paralelo a la dirección del viento, igual para dos boquillas.

- Con riego en bloques (aspersores 12 x 18 y una presión de 2,55 atm) se obtienen mayores CU cuando el aspersor se sitúa a 2,25 m de altura que a 0,65 m, con independencia de la velocidad del viento (modelo de reparto de agua se hace más triangular, mejorando los solapamientos).

Tarjuelo & Benito (2005) señalan que, ensayos con marcos de riego de 12 m x 18 m, en el centro de un bloque de riego formado por 16 aspersores trabajando a 25 mca, se han obtenido una mayor uniformidad de riego situando el aspersor a 2,25 m del suelo que a 0,65m, tanto cuando se utiliza una boquilla (4,8 mm) como dos (4,4 + 2,4) mm. La razón puede estar en el reparto en forma trinagular, incluso bajo la acción del viento.

2.8. Diseño hidráulico

El diseño hidráulico consiste en el dimensionamiento de la red de tuberías, que permite trasladar una determinada cantidad de agua desde la fuente hasta el área destinada al riego, disminuyendo las pérdidas de agua y maximizando las eficiencias de conducción, distribución y aplicación en todo el sistema de riego, con el objeto de conseguir un reparto uniforme del agua de riego (Vega, 2010)

2.8.1. Hidráulica de tuberías

Según Saldarriaga (2007) señala que, se utilizan las ecuaciones de conservación de la energía, haciendo uso a los términos que describen las pérdidas de energía, ocasionadas por la fricción entre el fluido en movimiento y la pared interna de la tubería. Estos términos se describen matemáticamente por medio de ecuaciones de fricción o de resistencia al fluir, por lo general relacionan la energía que se pierde con el flujo en sí, representando por la velocidad media del fluido o el caudal que pasa a través de la tubería.

Consideraciones generales: para los fluidos compresibles se aplica la ley de conservación de la materia exige que la cantidad de fluido que pasa por cada sección en la unidad de tiempo sea constante: $\rho AV = constante,$ siendo ρ la densidad del agua; A, es el área de la sección transversal, y V; la velocidad de la corriente del flujo. En el flujo incompresible la densidad es contante y la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$A_1V_1 = A_2V_2 = Q = constante$$

A la relación entre el gasto y el área de una sección se le denomina velocidad media dada con la siguiente expresión:

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

De donde:

$V =$ Velocidad media del flujo

$Q =$ Caudal o gasto

$A =$ Área de la sección transversal de la tubería

Según Saldarriaga (2007) señala las siguientes pérdidas de carga:

2.8.1.1. Pérdidas de carga por fricción longitudinal

Son las pérdidas que se producen a lo largo de la tubería, es decir en la tubería principal, secundaria y lateral. Para el cálculo de las pérdidas de carga longitudinales se utilizan las ecuaciones de Darcy - Weisbach y Hazen – Williams que son aplicables para diferentes tipos de tuberías. Las mismas están en función del fluido, velocidad, el diámetro de la tubería interna, caudal y el tipo de material de esta. Además estas ecuaciones no incluyen las pérdidas menores en entradas, codos y otros accesorios.

2.8.1.2. Pérdidas locales

Son las que se producen en los equipos y accesorios. Se crean por las turbulencias que ocurren en el flujo por cambios abruptos en el diámetro de la tubería, el paso del agua por una válvula, torceduras y cambios de dirección de la tubería; también se suele consideran la suma de las pérdidas menores deber ser inferior al 30 % de las perdidas por fricción longitudinal de tubería, esta condición es cierta en la mayoría de diseños convencionales de tuberías, cumple con la siguiente ecuación: $\sum h_m \leq 0{,}3h_f$**;** en la tabla 1, se presentan los coeficientes de pérdida por accesorios.

Tabla 1. Coeficientes para pérdidas menores en accesorios ($\boldsymbol{km}$)

Accesorio	km
Válvula de globo, completamente abierta	10
Válvula de cheque, completamente abierta	5
Válvula de compuerta, completamente abierta	2.5
Válvula de retención	2.5
Unión	0.30
Ampliación gradual	0.30
Salida del tubo	1
Tee en sentido recto	0.3

Fuente: Hidráulica Saldarriaga (2007)

2.8.1.3. Diseño del lateral

Vivar (1995), acota que la pérdida de frición en el diseño de una lateral, va a depender de la posición del mismo, entre los cuales se tiene: horizontal (nivel), ascendente y descendente; en esta tubería existen derivaciones en la que se producen una repartición de caudal, y en el tramo que sigue el flujo disminuye a medida que el agua sale por los aspersores, resultando en un pérdida de fricción más pequeña en las secciones de tubo alejadas de la entrada de la lateral, según sea la disposición del lateral, debido a que la topografía y el gradiente hidraulico influyen en el cálculo; si se considera los factores ya expuestos se complicaría demasiado, pues, habría que repetirlo para cada tramo de distinto caudal, el investigador norteamericado Christiansen, formuló lo que él llamo Coeficiente de Reducción por Salidas; a continuación de describe el método del coeficiente de Christiansen:

2.8.1.3.1. Coeficiente de Christiansen (F)

Para evitar el procedimiento tan engorroso de calcular pérdidas de carga, tramo a tramo, Christiansen ideó un método basado en calcular la pérdida en una tubería de igual longitud, diámetro, rugosidad, y que transportan el mismo flujo, con salidas intermedias, por la que circula el caudal Q. Posteriormente se multiplica por un coeficiente reductor F (Factor de Christiansen) para que las pérdidas en ambos casos sean equivalentes; y permite determinar la pérdida de carga real en una tubería, que presente derivaciones con caudales similares a intervalos regulares, como sucede en el riego por aspersión y goteo (Vega, 2010).

Según Valarezo (2013) señala que, el coeficiente de reducción (F) en tuberías con salidas múltiples, es función de: número de salidas, material de la tubería, ubicación del primer aspersor con respecto al origen del lateral. Se presentan tres condiciones y las fórmulas para la determinación del factor (F) según sea el caso:

a) Cuando el primer aspersor está ubicado a una distancia igual al espaciamiento del resto de aspersores en el lateral (Ea).

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

De donde:

$F =$ Factor de Christiansen, es un coeficiente reductor que depende de N, m y tienen en cuenta la disminución del caudal a lo largo del ramal.
$N =$ Número de derivaciones
$M =$ Exponente de la velocidad en la fórmula de pérdidas de carga utilizada: PE = 1,7, PVC = 1,8 y Aluminio = 1,8.

b) Cuando la primera salida se ubica a una distancia (Ea/2) del inicio del lateral.

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

c) Cuando la primera salida está al inicio de la entrada del lateral

$$F = \frac{N\left(\frac{1}{B+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2}\right) - 1}{n-1}$$

2.8.1.3.2. Criterios para determinar el dimensionamiento de un ramal de aspersores

Vivar (1995) manifiesta que, la condición de diseño en los sitios de máxima y mínima de presión a lo largo de una tubería lateral dependen: de la pendiente del terreno, gradiente de pérdida de fricción; del diámetro de la tubería, material (coeficiente de rozamiento), del caudal de descarga y número de aspersores por lateral.

Tarjuelo & Benito (2005) señalan que, la base principal para la determinación de los diámetros de los ramales portaaspersores se fundamenta en la uniformidad de distribución de caudales en el área de riego. Para tales efectos de cálculo, dentro de un proyecto específico, debe tenerse presente la siguiente regla, que la diferencia de presión entre el primero y último aspersor en un lateral no deben exceder al 20 % de la presión media o presión nominal del aspersor a lo largo del lateral. Esta diferencia del 20% produce que el caudal descargado por dos aspersores cualesquiera de un ramal sea inferior al 10% del caudal nominal. Este mismo criterio podría

aplicarse al conjunto de ramales que constituyen un bloque de riego en los sistemas que llevan una sola válvula por bloque.

Teniendo en cuenta lo anterior sobre la ecuación de descargar de los aspersores, esta variación de caudal es equivalente a una variación de presión del 20% de la presión promedio nominal del aspersor, de esta manera se tendrá como condición de diseño:

$$\frac{P_m}{\gamma} - \frac{P_n}{\gamma} \leq 0{,}2\frac{P_a}{\gamma}$$

De donde:

$\frac{P_m}{\gamma}$ = Máxima presión en el aspersor de los conectados al ramal, (m)

$\frac{P_n}{\gamma}$ = Mínima presión del aspersor de los conectados al ramal, (m)

$\frac{P_a}{\gamma}$ = Presión nominal del aspersor, que se hará coincidir con la presión promedio en el ramal, (m)

Los sitios de máxima y mínima presión a lo largo de una tubería lateral, pueden variar en función de la pendiente del terreno y del gradiente de pérdida de fricción.

2.8.1.3.3. Cálculo de un ramal portaaspersores

Tarjuelo & Benito (2005) señalan que, se ha comprobado experimentalmente que en un ramal horizontal dicha presión media corresponde a un punto situado a $\frac{1}{3}$ de la longitud del origen, y que en el tramo que va desde el origen hasta este punto se produce aproximadamente el 75% de la pérdida de carga total del ramal. Para el diseño del tramal la presión media en el mismo se hace coincidir con la presión nominal del aspersor del $\frac{P_a}{\gamma}$.

Tarjuelo & Benito (2005) señalan que, en base a la posición del lateral se presentan tres casos:

a) Lateral horizontal

La máxima presión se presenta en el origen del lateral y la mínima en el extremo del lateral; se basa en las siguientes ecuaciones:

- ✓ Ecuación de funcionamiento se la expresa de la siguiente manera:

$$\frac{P_o}{\gamma} = H_a + \frac{P_n}{\gamma} + h_f$$

De donde:

$\frac{P_o}{\gamma} =$ Presión en el origen del lateral (m)

$H_a =$ Altura del portaaspersores, (m)

$\frac{P_n}{\gamma} =$ Presión del aspersor al final del lateral, (m)

$h_f =$ Pérdida por fricción, (m)

- ✓ Ecuación de diseño que limita la máxima diferencia de presión entre dos aspersores del lateral, se la expresa de la siguiente manera:

$$\left(\frac{P_o}{\gamma} - H_a\right) - \frac{P_n}{\gamma} = h_f \leq 0{,}2\,\frac{P_a}{\gamma}$$

De donde:

$\frac{P_o}{\gamma} =$ Presión máxima o en el origen del ramal, (m)

$H_a =$ Altura del portaaspersores, (m)

$\frac{P_n}{\gamma} =$ Presión mínima o presión en el último aspersor, (m)

$\frac{P_a}{\gamma} =$ Presión nominal del aspersor, (m)

$h_f =$ Pérdida de carga en el lateral, (m)

- ✓ Presión máxima o en el origen del lateral se la expresa de la siguiente manera:

$$\frac{P_o}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} + \left(\frac{3}{4}\right) h_f + H_a$$

- ✓ Presión mínima o presión en el último aspersor se la determina con la siguiente expresión:

$$\frac{P_n}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - \left(\frac{1}{4}\right) h_f$$

b) Lateral ascendente

La máxima presión se presenta en el origen del lateral y la mínima en el extremo del lateral; y cuando existen laterales ascendentes, se considera como positivo el desnivel geométrico entre los extremos del ramal; y se basa en las siguientes ecuaciones:

- ✓ Ecuación de funcionamiento se la expresa a continuación:

$$\frac{P_o}{\gamma} = H_g + H_a + \frac{P_n}{\gamma} + h_f$$

De donde:

$H_g =$ Desnivel geométrico entre los extremos del ramal.

- ✓ Ecuación de diseño está dada por la máxima diferencia de presión entre los aspersores extremos del ramal, se la expresa de la siguiente manera:

$$\left(\frac{P_o}{\gamma} - H_a\right) - \frac{P_n}{\gamma} = h_f \leq 0{,}2\,\frac{P_a}{\gamma} - H_g$$

- ✓ Presión máxima o en el origen del lateral se determina de la siguiente forma:

$$\frac{P_o}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} + \left(\frac{3}{4}\right) h_f + \frac{H_g}{2} + H_a$$

- ✓ Presión mínima o presión en el último aspersor se la expresa a continuación:

$$\frac{Pn}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - \left(\frac{1}{4}\right) h_f - \frac{H_g}{2}$$

c) Lateral descendente

Es preciso indicar que en este tipo de ramales la presión mínima $\frac{P_n}{\delta}$ ya no se encuentra en los extremos; sino en un punto intermedio, pero el error suele ser pequeño en riego por aspersión si se mantiene como condición de diseño, que la diferencia entre la presión en los extremos debe ser menor al 20% de la presión nominal y de esta manera se simplifican los cálculos, a la presión en el extremo se denomina $\frac{P_u}{\delta}$.

Valarezo (2013) señala que, en el lateral descendente, la presión máxima se puede dar en uno de sus extremos; y, la mínima, en cualquier punto, excepto en el extremo aguas abajo en el final del lateral.

Se presentan tres casos de acuerdo a la pendiente del terreno: cuando el ramal es descendente: $h_f > H_g$; $h_f = H_g$ y $h_f < H_g$.

- ✓ **Primer caso $h_f > H_g$**

La presión máxima se encuentra aguas arriba del origen del lateral, se determina mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación de funcionamiento se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{P_o}{\gamma} + H_g = H_a + \frac{P_u}{\gamma} + h_f$$

Ecuación de diseño esta dada por la máxíma diferencia de presión que corresponde a los aspsersores extremos, y esta definida por la siguiente expresión:

$$\left(\frac{P_o}{\gamma} - H_a\right) - \frac{P_n}{\gamma} = h_f \leq 0{,}2\frac{P_a}{\gamma} + H_g$$

Presión máxima o en el origen del lateral se determina con la siguiente expresión:

$$\frac{P_o}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} + \left(\frac{3}{4}\right) h_f - \frac{H_g}{2} + H_a$$

Presión mínima o presión en un punto intermedio del lateral se calcula con la siguiente expresión:

$$\frac{Pn}{\gamma} = \frac{P_o}{\gamma} - t'\left(h_f\right) + H_a$$

De donde:

$$t' = 1 - \left(\frac{H_g}{h_f}\right) + 0{,}357\left(\frac{H_g}{h_f}\right)^{1{,}57}$$

Presión al final o en el último aspersor

$$\frac{P_n}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - \left(\frac{1}{4}\right) h_f + \frac{H_g}{2}$$

- ✓ **Segundo caso $\boldsymbol{h_f = H_g}$**

Las presiones serán casi uniformes en todo el ramal, se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$\frac{P_n}{\gamma} \approx \frac{P_a}{\gamma} \; y \; \left(\frac{P_o}{\gamma} - H_a\right) \approx \frac{P_a}{\gamma}$$

- ✓ **Tercer caso $h_f < H_g$**

En este tipo de diseño, se deduce que la presión mínima ocurre aguas arriba, y la presión máxima aguas abajo del lateral; se basa en las siguientes ecuaciones:

Ecuación de funcionamiento se la expresa de la siguiente manera:

$$\frac{P_o}{\gamma} + H_g = H_a + \frac{P_u}{\gamma} + h_f$$

Ecuación de diseño esta dada por la diferencia de presión entre los aspsersores extremos. Esta definida por la siguiente expresión:

$$\frac{P_u}{\gamma} - \left(\frac{P_o}{\gamma} - H_a\right) = H_g - h_f \leq 0{,}2\frac{P_a}{\gamma}$$

Presión mínima o en el origen del lateral se la determina con la siguiente expresión:

$$\frac{P_o}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} + \left(\frac{3}{4}\right) h_f - \frac{H_g}{2} + H_a$$

Presión máxima o en el último aspersor se la expresa de la siguiente manera:

$$\frac{P_u}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - \left(\frac{1}{4}\right) h_f + \frac{H_g}{2}$$

2.8.1.4. Presión total del sistema

La presión total, para que funcione el sistema de riego, es equivalente a la sumatoria de: la pérdida por fricción en la tubería, pérdidas locales, pérdida en la múltiple, perdida de carga del emisor de riego, y la altura del elevador (Vega, 2010).

2.9. Eficiencia de Riego

Los parámetros de operación utilizados para describir, que tan bien opera un sistema de riego son: eficiencia de conducción, eficiencia de aplicación, eficiencia de uso de agua de riego, uniformidad de distribución y eficiencia de almacenamiento (Calvache, 2010).

Los parámetros de eficiencia y uniformidad ayudan a cuantificar la uniformidad y el grado en que el riego es adecuado, de manera tal que el funcionamiento del sistema pueda ser evaluado, mejorado y mantenido (Calvache, 2010).

2.9.1. Eficiencia de Distribución: Coeficiente de Uniformidad de Christiansen

Zuñiga (2004) señala que, el coeficiente de uniformidad en los sistemas de riego por aspersión planteado por Christiansen (1942), fue el primero en aplicar el concepto de medir la uniformidad de la distribución del agua, en un sistema de riego por aspersión. Se considera el coeficiente de uniformidad (CU) como una medida de la uniformidad de aplicación de agua.

Cada perfil de humedecimiento tiene espaciamiento recomendado entre aspersores, basado en el diámetro efectivo de cubrimiento, bajo condiciones de campo específicas, es conveniente evaluar el equipo de aspersión mediante pluviómetros o tarros recolectores de agua ubicados según la distribución de los aspersores (Vivar, 1995).

Como los aspersores riegan áreas circulares o sectores de áreas circulares, se entiende que ninguna dimensión de espaciamiento alcanzará un 100 % de uniformidad de distribución, Christiansen (1942), ha proporcionado una fórmula para determinar y caracterizar la uniformidad de la distribución del agua, que se le conoce, como la ecuación del coeficiente de uniformidad (Cu).

El coeficiente de uniformidad de Christiansen (Cu), que relaciona la variabilidad espacial de la lámina de riego distribuida en todo el campo. Es ampliamente usado, y un Cu igual o mayor que 0.7 es considerado aceptable a la práctica del diseño de sistema de riego por aspersión (Zuñiga, 2004).

2.9.2. La uniformidad de distribución (UD)

Describe la relación entre la lámina de agua infiltrada en la cuarta parte del campo (25%), que recibe las menores cantidades de agua y el promedio de la lámina. En el riego por aspersión la lámina infiltrada puede reemplazarse por la lámina aplicada.

En la figura 5 presenta la forma de medir la distribución aérea del agua por los aspersores, la que es una función de traslape, modelos de distribución del agua por el aspersor y efecto del viento en estas variables; y el cuadro 2, presenta la clasificación de los valores de: Cu y UD.

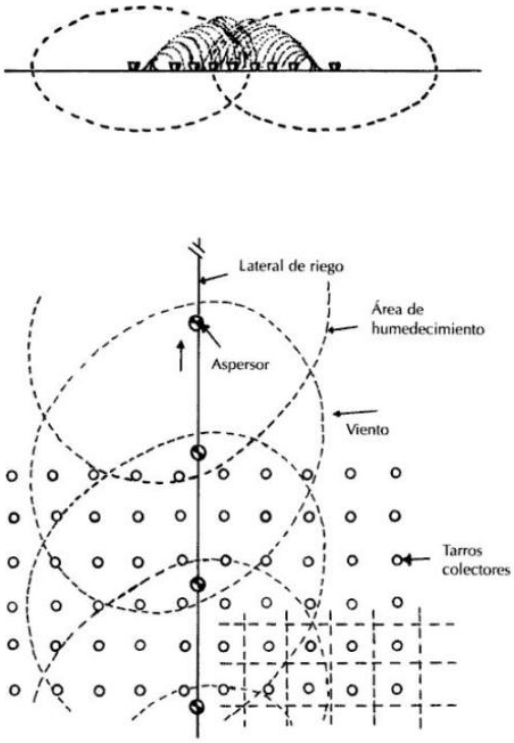


Figura 5. Colocación de pluviómetros o tarros colectores de agua para determinar la uniformidad de distribución (UD) del agua emitida, por los aspersores en un lateral de riego

Cuadro 2. Valores de los coeficientes de uniformidad de distribución CU y UD

Valor de CU y UD	Calificación
Mayor a 85%	Excelente
De 80 – 85%	Buena
De 75 – 80%	Aceptable
Menor 75%	Inaceptable

2.9.4. Factores que depende la uniformidad de distribución

Tarjuelo & Benito (2005) manifiestan que, la apliación uniforme depende principalmente de: diseño del aspersor, tipo y numero de boquillas y la presión de trabajo (lo que define el modelo de reparto de agua del aspersor), así como la disposición de los aspersores en el campo (marco de riego). A estos factores se pueden añadir, otros como el viento, presión de trabajo, efectos en los bordes de la parcela, boquillas y de menor trascendencia la altura del emisor y tiempo de riego; a continuación se describen algunos de ellos:

a) El viento:

Es el principal, distorsionador de la uniformidad de reparto, que afecta el riego, pues ya no sería uniforme si existieran días de vientos acentuados. Teniendo diferente repercusión según el tamaño de gota y la trayectoria que tenga que recorrer ésta en la caída, influyendo en gran medida en la evaporación y en el arrastre fuera del área regada de parte del agua aplicada.

La acción del viento determina el espaciamiento entre aspersores: la velocidad y la dirección son las principales características del viento que influyen en el riego por aspersión.

b) Presiones de trabajo:

Presiones media de trabajo: se aplica una eficiencia de aplicación del 75% UD, son obtenibles con un distanciamiento de aspersores y tendidas de líneas de riego, si las presiones de trabajo de los aspersores son apropiadas entre 20 y 30 m.

Presiones bajas de trabajo: causan menor uniformidad de la distribución del agua entre los aspersores y la consecuencia es la eficiencia baja entre 65 y 70% de UD; la presión de trabajo de los aspersores está entre 10 y 15 m (ocurre donde el desnivel entre la fuente y la parcela a regar es insuficiente) (Anten & Willet, 2000).

c) Efecto en los bordes:

En el caso de pequeñas parcelas y aspersores con diámetros de humedecimiento grandes, pueden hacer importantes pérdidas en los bordes: para tener un buen humedecimiento de toda

la parcela, es inevitable regar una franja alrededor de la parcela que recibirá menos agua que la parcela misma. Se puede solucionar eso escogiendo aspersores sectoriales, aspersores con diámetros más pequeños o plantas en esta franja otros cultivos que se adapten al riego deficiente y aprovechen el agua al máximo (Anten & Willet, 2000).

d) Boquilla:

El efecto del viento es mayor con aspersores que pulverizan mucho el agua, esto ocurre cuando las boquillas son menores (de 1 a 3 mm), y cuando las presiones de trabajo de los aspersores son mayores.

El ángulo de boquilla con respecto al horizonte y la altura de elevación del aspersor; un ángulo mayor y una elevación mayor ambos producen una mayor elevación del chorro en el aire y una mayor exposición del viento (Anten & Willet, 2000).

2.10. Importancia del riego en los pastos para la alimentación bovina

El 50% de los costos de producir un litro de leche corresponde a la alimentación en base a pastos, son el sustento más abundante y barato para todos los herbívoros, incluyendo rumiantes y animales menores. El riego para pastos, el uso de esta capacidad puede transformar las parcelas agrícolas sin riego, a un incremento en la producción de carne y leche (Cardona, 2012).

El éxito de la exploración, en el pasto para la ganadería dependen, entre muchos factores, el establecimiento de buenos pastos y manejo del pastoreo; el manejo adecuado de riego y sobre todo el cuidado, del agua y los nutrientes, aplicado a los forrajes, lo que garantiza una producción óptima y sin desperdicio de los recursos hídricos (Cardona, 2012).

2.10.1. Condiciones climáticas

Hay varios factores climáticos que influyen en el crecimiento de los pastos, como ejemplo; la precipitación, la humedad relativa y la temperatura del aire, la radiación solar y otros. El aumento de forrajes no solo depende del riego, ya que el crecimiento de forraje también está determinada por la temperatura y el fotoperiodo, además de la cantidad de agua y nutrientes

En Brasil, el riego de pastos se introdujo con el fin de aumentar la producción de forraje durante la estación seca, reduciéndolo a la estacionalidad de producción de cultivos forrajeros. En los estudios clásicos realizados en el sudeste de Brasil, con el uso de riego en potreros de pasto elefante, provocó un aumento en la producción de forraje anual. Sin embargo, los valores observados en la estación seca representaron sólo el 30% de la producción obtenida durante la época de lluvias (Vinhas, Rodrigues, Mistura, Duarte, & Cunha dos Santos, 2011)

2.10.2. Aplicación de láminas de riego

Otra estrategia para mejorar la eficiencia de utilización de la irrigación de pastoreo, es establecer la frecuencia de riego y el manejo de fertilizantes praderas de riego. Por ejemplo en Brasil, evaluaron la respuesta productiva de pasto Tanzania, con las siguientes profundidades de agua (50, 75, y 100% para la restauración completa de la disponibilidad de agua del suelo) y tres frecuencias aplicación (1, 4 y 7 días) y se encontró una mayor producción de forraje con el uso de 100% riego, y la frecuencia de días de riego (Vinhas *et al*., 2011).

2.10.3. Métodos de riego en pasturas

- ✓ En Brasil, la mayor parte de las propiedades, que practicar el riego de pastos usar; el spray en las formas de pivote central, malla, y en menor medida, cañones autopropulsados, por aspersión (convencional, pívot central) (Vinhas *et al*., 2011).

- ✓ La mayor parte de la producción agropecuaria en la república Argentina se, desarrolla en ambiente subhúmedos o semiáridos por lo que uno de los principales factores que limitan la producción agrícola - ganadera, es la escasez e inadecua distribución de las precipitaciones. Por lo que el riego se convirtió en la tecnología agropecuaria que permite revertir estos problemas potenciando además las condiciones edafoclimáticas de cada área donde se lo utiliza. Utiliza sistema de riego por pívot central, al transformar la parcelas de secano con riego, aumento la producción, rendimiento de los cultivos y mejorar la actividad agropecuaria (Aquiles, 2010).

- ✓ En Uruguay, el sector agropecuario, en los sistemas agrícolas y pastoriles se riega bajo el sistema de pivotes centrales, se acoplan los siguientes emisores: Spinner Nelson, y K –line, este sistema también es utilizado en Chile.

- ✓ En Chile y Uruguay se introdujo un sistema de riego para pasturas de denominado K-line desarrollado por la empresa RXP Plasticst Ltd., de nueva Zelanda, el agua es un recurso escaso y extremadamente importante para la producción agropecuaria, en este sentido K-line es una solución, para hacer el uso eficiente del agua, El corazón del sistema es una serie de cacerolas de plástico de alta resistencia, que ofrecen de anclaje a los aspersores, estos aspersores están separados a 15 m unos de otros, en la línea de riego, dicha línea de riego, se destaca por su resistencia y flexibilidad, el sistema trabaja con bajos caudales, que acompasan con la capacidad de absorción de los suelos, evitando así el encharcamiento y compactación. Trabaja con bajas presiones de 2 a 5 atm (Formoso & Norbis).

2.11. Trabajos relacionados con el diseño de riego por aspersión

- ✓ Macías, *et al*., (2011), en la Universidad Técnica de Manabí, realizó una instalación de un sistema de riego por aspersión, para cultivos comerciales establecidos en la comunidad El Milagro del cantón Portoviejo. El objetivo general del proyecto fue adaptar e instalar un sistema de riego por aspersión para aprovechar adecuadamente el recurso agua en los cultivos, para lo cual, establecieron la metodología adecuada para determinar los parámetros Hidrofísicas del suelo, y la evapotranspiración de cultivo que permitieron realizar el diseño agronómico e hidráulico del sistema de riego por aspersión.

- ✓ Guerrero (2012), como proyecto de tesis realizó un Diseño de Riego por Aspersión con Automatización en el sector de Ugñag, Cantón Penipe, con la finalidad de beneficiar a 143 lotes. Teniendo como recurso disponible el agua de la toma Matus – Penipe que tiene un caudal de 75 l/s tres días a la semana; los objetivos que se analizó son: estudiar las propiedades físicas e hídricas de los suelo; diseñar obras civiles de captación y conducción del fluido del agua; seleccionar tuberías y accesorios de riego; y los resultados señalaron lo siguiente: la necesidad máxima de riego se da en el mes de noviembre con un promedio de 3,88 mm/día, para un determinado patrón de cultivos que se analizó, se obtuvo mediante el software Cropwat de la FAO; instalación de un sistema de riego semifijo, y un tanque de reservorio de 6000 m^3; instalación de dos tuberías de conducción de material PVC, 10 tuberías laterales y 12 tuberías de distribución teniendo disponible un hidrante por cada ½ hectárea, donde se acopló el ramal móvil, y en el mismo se incorporó un aspersor tipo Xcel Wobbler de la empresa Plastigama; los turnos de riego de dos días para los 143 lotes, los cuales se agrupo en 9 módulos, cuyo caudal comprendido por módulo entre (0,01 a 3,65 l/s).

- ✓ Ramos & Báez (2013), realizó un diseño y construcción de un sistema de riego por aspersión en un parcela demostrativa (48 x15) m en el cantón Cevallos, para el cultivo de alfalfa. Los objetivos analizados fueron: analizar el suministro de uso de agua en el cantón Cevallos; diseñar un sistema de control que permita la distribución de agua; distribuir el recurso hídrico con el fin de evitar el riego innecesario; contribuir y comprobar el funcionamiento del sistema tecnificado de riego; y elaborar un manual de operación y mantenimiento del sistema. Los resultados fueron: se dotó de una fuente de agua a través de una cisterna de 50 m^3, y se dispuso de energía que sirvió para la automatización del sistema; el requerimiento

de riego en su máxima de demanda, fue en el mes de enero con un ETc de 2,60 mm/día, se empleó para su cálculo el software Cropwat 8.0; se eligió un aspersor de medio alcance de la marca NETAFIM modelo MEGANET 650; instalación de tubería de conducción y laterales de PVC; y la potencia de la bomba para el funcionamiento hidráulico del sistema es de 1HP.

- ✓ Morales (2002), en el centro experimental docente de agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se determinó los parámetros de aplicación del agua, por el equipo de riego a presión, mediante la evaluación del sistema, donde se analizó los parámetros de coeficiente de uniformidad de Christiansen Cu, y la eficiencia de distribución UD. Los resultados señalaron, para el riego por aspersión modelo NELSON Serie F70, boquillas (7/32" a 12/32") marco de riego (18 x18 m); cultivo de gramíneas, se obtuvo; un Cu = 70%, y UD 53%., estos valores bajos en los coeficientes, el valor mínimo de UD para riego agrícola deber ser del 67%. (Merrian y Keller, 1978), se explicaron por el efecto de los factores climáticos (temperatura, humedad relativa, y especialmente el viento de 4,32 m/s), que distorsiona los patrones de aplicación. Mientras que para sistema por goteo de goteros autoregulables resultó, ser más efectivo, especialmente para cultivos de hortalizas, al tener una mejor distribución del agua, con un Cu del 94,5 % y el valor UD de 88%, lo cual significa, uniformidad buena y se adapta a altas velocidades del viento.

- ✓ Macias & (Macias & Pin, 2011)Pin (2011), en la Universidad Técnica de Manabí, se evaluó las condiciones de riego, para mejorar la producción y optimizar el pasto que es consumido por el ganado, esencial para su mantenimiento, evaluaron la uniformidad del agua del sistema de riego por aspersión, el cual se realizó en 3 parcelas distintas; los resultados más representativo fueron los siguiente: para un marco de riego (26 x 28) m, para el modelo del aspersor 70.25 RD -2, boquillas 5 mm, se obtuvieron valores de: índices de grosor (IG), de 5,6 indica gotas gruesas, aceptable para el cultivo de pastos, CU = 81,67 %, presión de funcionamiento del aspersor de 4.22 atm y una velocidad del viento 1,1 m/s. Se concluye que las presiones de funcionamiento de 3,5 atm a 4,22 atm, producen uniformidades óptimas.

- ✓ Pulamarin & Necpas, (2011), realizó el Estudio de Factibilidad de los sistema de riego por aspersión comunitarios en la microcuenca del río Chimba, de la organización COINA. El objetivo central es: Diseñar participativamente los sistemas de riego por aspersión

comunitarios en el marco territorial de la organización COINA, poniendo en práctica criterios técnicos agropecuarios, hidráulicos, económicos, sociales y ambientales. Resultados del proyecto: el patrón de cultivo son los pastos para el manteniendo de las fincas ganaderas; el balance de hídrico de la microcuenca del río la Chimba resultó, un caudal disponible de 1,104 l/s, mientras que, el caudal calculado para el cultivo de pasto es de 819 l/s, mismo que permitió regar una superficie de 2271,40 ha, y por lo tanto el caudal disponible es favorable para suplir las necesidad de riego, de este aporte agua se benefició las comunidades de Chimba, Cariacu, y Paquiestancia, por lo que se pudo regar en condiciones normales, por ello se aplicó una lámina de 8 mm a intervalos de 7 días de riego, de igual forma no tendrían ningún inconveniente de escasez de agua; la selección del aspersor fue del modelo SENINGER 8025 cuyo diámetro de cobertura es de 50 m, marco de riego (40 x 40) m, ideal para aplicar el riego al cultivo de pasto; se utilizó como la fuente de energía el desnivel topográfico de hasta 200 m a favor; instalación de hidrante de 2 " conformado por válvula de bola y adaptadores, se incorporó un equipo móvil de un tramo promedio de 100 m y finalmente la construcción de tanques de captación, reservorios y tanques rompe presión.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra en la Parroquia Lauro Guerrero del Cantón Paltas, Provincia de Loja. En esta parroquia existe la comuna Chinchanga, en la cual se ubica la finca "Landapo", donde se realizó el "Diseñó e implemento del sistema de riego por aspersión para pasto", en la figura 6, se presenta el sitio de estudio.

De a acuerdo a la división política está limitado por las siguientes parroquias:

Norte: Orianga y al **Oeste:** Guachanamá, cantón Paltas,
Este: Santa Rufina y Buena Vista, cantón Chaguarpamba y Cangonamá, cantón Paltas,
Sur: Casanga, cantón Paltas.

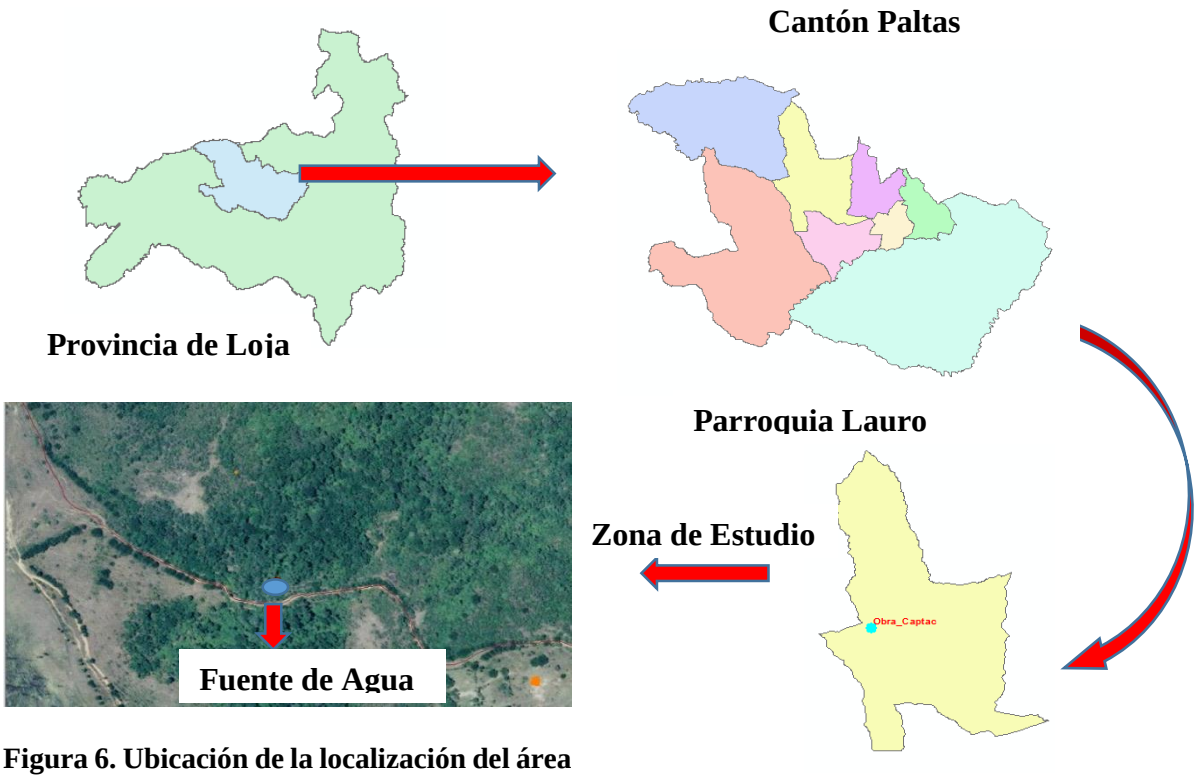


Figura 6. Ubicación de la localización del área de estudio

3.2. Fuente de agua

En la figura 7, se encuentra la fuente de agua en el siguiente sistema de coordenadas planas (UTM):

Coordenada Norte: 9 563 916 m
Coordenada Este: 632 307 m
Altitud: 2 114 m.s.n.m

Figura 7. Obra de captación con mampostería de piedra

3.3. Condiciones climáticas

Clima

La parroquia Lauro Guerrero, presenta un clima temperado húmedo, está relacionado con los rangos de temperatura, en la parte alta de 14 °C a la altitud de 2 500 m.s.n.m y en la parte baja 22 °C a 800 m.s.n.m

La precipitación media anual es de 1345.1 mm, su distribución no es uniforme a lo largo del año, en lo que se puede diferenciar los meses de déficit de agua, van de junio a noviembre y excesos de diciembre a mayo (GAD PALTAS, 2014 - 2019),

Hidrografía

La red hidrográfica de la parroquia está compuesta por quebradas intermitentes y permanentes que van a desembocar en el rio Catamayo y rio Puyango, cada uno le corresponde a la cuenca de Catamayo Chira, y la de Puyango (GAD PALTAS, 2014 - 2019).

Zonas de vida

Según la zona de vida de Holdrige se encuentra dos ecosistemas:

Bosque húmedo montano bajo (bh –Mb), se halla entre los 1.800 - 2.000 msnm y Bosque húmedo montano (bh –M), se halla entre los 2500 a 3000 m.s.n.m. la topografía de esta formación es de montañosa a escarpada. Presenta vegetación natural que se conserva inalterable que ha servido como protectores de las cuencas y, existen ciertas áreas dedicadas al pastoreo (GAD PALTAS, 2014 - 2019),

3.4. Materiales

- ✓ Cartografía del sitio estudio (IGM, POT Paltas, Ortofotos escala 1: 5000).
- ✓ Modelos de digital del terreno (Curvas de nivel).
- ✓ Datos climáticos precipitación y temperatura publicada por el INAHMI.
- ✓ GPS (Sistema de posicionamiento Global) GARMIN
- ✓ Aforador de agua (balde de volumen conocido)
- ✓ Cronometro
- ✓ Cilindro infiltrómetro
- ✓ Barreno (fundas recolección muestras de suelo)
- ✓ Cilindros Koppecky (muestras de suelo inalteradas)
- ✓ Libreta de apuntes
- ✓ Catálogos de aspersores y tuberías
- ✓ Medidor de presión (manómetro)

3.5. METODOLOGÍA

3.5.1. Metodología para el primer objetivo

"Diseñar un sistema de riego por aspersión para el cultivo de pasto en la finca Landapo".

3.5.1.1. Georeferenciación y medición del caudal de la fuente de abastecimiento

De la fuente de agua disponible en la zona de estudio, se hizo un diagnóstico del lugar del afluente, para determinar el origen del mismo, que puede ser superficial o subterránea. Luego se procedió a toma de coordenadas planas (UTM); longitud, latitud y la altitud.

Se registró el aforo de un caudal diario en época de estiaje, con el objetivo de tener un valor referencial del caudal, que circula en la época más crítica del año. Se realizó el aforo volumétrico, el cual permitió la medición de pequeños caudales, en una tubería de 25 mm. Esta operación se hizo 3 a 4 veces con el fin de obtener datos confiables y exactos.

Para lo cual se utilizó la siguiente expresión matemática:

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

Q = caudal, (l/s)

V = volumen, (l litros)

t= tiempo, (s segundos)

3.5.1.2. Levantamiento planímetro de la superficie a regarse

El levantamiento de la superficie regable se realizó con el GPS recorriendo el área de interés de riego.

Se consideró los siguientes aspectos:

- ✓ Verificación del sistema de referencia del equipo, para esta región se tomó el Datum WGS 84, Zona 17 Sur, en el sistema de proyección Universal Transversa Mercator (UTM).

- ✓ Recolección de datos, en sitios despejados libres de nubosidad o algún otro obstáculo que no permita recibir la señal de la información GPS.

- ✓ Este equipo GPS tiene un margen de error +/-5 m, pero se ajustó su valor a uno más próximo a la realidad de la superficie utilizando Ortofotos (fotografías áreas) a escala 1:5 000.

Procesamiento de los puntos GPS en el software de AutoCAD CIVIL 2010:

- ✓ Realización de la planimetría (se indicó la fuente de agua y límites de la superficie de riego).

- ✓ Para la generación de las curvas de nivel, se utilizó los modelos de digital del terreno (MDT), la cual presentan un margen de error +/-1 m. Esta información cartográfica se caracteriza por: la representación de altitudes del terreno natural, reflejando la morfología propia de la superficie terrestre; este tipo de modelo no considera la superficie como: infraestructura, construcciones, vegetación.

- ✓ Se adquirió el modelo digital del terreno MDT en el CINFA (Centro Integrado de Geomática Ambiental) de la Universidad Nacional de Loja, el procesamiento se apoyó en los Sistema de información Geográfica con el programa ArcMap 10.2, el cual dio como resultado las diferencias de altura, y la generación de curvas de nivel a 1 m, con esto permitió una mayor aproximación del relieve del terreno (Anexo 10).

- ✓ Finalmente se obtuvo un plano topográfico, con curvas de nivel a cada metro, donde consta la fuente de agua, el área regable, la distribución de la línea de riego y aspersores (Anexo 10 y 12).

3.5.1.3. Estudio de suelo

Las muestras se suelos tomadas en el área de riego fueron de dos tipos que a continuación se describen:

- Se recolectó 4 muestras alteradas a la profundidad de 20 cm, para lo cual se consideró el siguiente criterio: se recorrió en zig – zag el terreno, luego se tomó submuestras de características similares de suelo, de acuerdo al color y a las diferentes texturas presentes.

- Se recolectó muestras inalteradas, por medio de los cilindro Koppecky de 100 cm^3, para ello se introducen verticalmente a través de un barreno, a la profundidad de 20 cm, se hizo 4 muestras de suelo con 3 repeticiones (Anexo 3).

Se llevó las muestras tomada en el campo, al laboratorio de Suelos, del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja, para su respectivo análisis textural se aplicó el método de Bouyoucos, materia orgánica MO método Walkley y Black, y las constantes hidrofísicas (densidad aparente, capacidad de campo y punto marchitez permanente) para esto se procedió a su análisis, en laboratorio con el equipo de la cámara de presión; se fijó la CC a la tensión de 1/10 atm (pF[1] 2) para la mayoría de los terrenos agrícolas de textura media o arenosa y el punto de marchitamiento, a la tensión de humedad de 15 atm (pF 4,2) (Anexo 5).

a) Elaboración de la curva de retención de humedad del suelo

Se graficó la curva de retención de humedad, para lo cual, se relacionó la energía con que el agua es retenida en el suelo, con el contenido de humedad en base a volumen; para tal efecto se utilizó los resultados de las constantes hidrofísicas del suelo. (Anexo 6).

[1] pF (potencial de energía libre).

b) Evaluación de las condiciones físicas del suelo

Se utilizó el diagrama triangular de la evaluación de las condiciones físicas del suelo. (Anexo 6); el mismo que relaciona los valores de:

VFI Volumen físicamente inerte %, (es igual al volumen de sólidos VS %, más el volumen inútil de porosos correspondiente al valor de contenido volumen de agua a PMP %), Agua aprovechable % y Capacidad de aireación %, obteniendo todos estos parámetros, se dirigió al diagrama triangular, donde se clasificó, la zona de condición física del suelo, para el desarrollo de la planta.

c) Determinación de la velocidad de infiltración del agua en el suelo

Se realizó 3 repeticiones de la prueba de infiltración dentro del área de estudio, con una duración del ensayo 1,5 horas.

La infiltración se determinó, por medio del método de doble anilló; consistió en la utilización de dos anillos estandarizados para riego en diámetro, altura y fabricado de material de acero. Correspondiente a las siguientes dimensiones: el diámetro externo de 25 cm y el interno de 12 cm, la altura de ambos es de 25 cm, en la figura 8, se representa el equipo de medición (cilindro infiltrómetro de doble anillo) para la prueba de infiltración.

Figura 8. Utilización del método de doble anillo, con sus respectivos cilindros infiltrómetros (prueba de infiltración)

Se ubicó el anillo a 10 cm de profundidad, luego se llenó con agua al anillo, y se empezó a tomar los datos de tiempo y lecturas del descenso del nivel de infiltración. El intervalo de tiempo se consideró de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos, hasta que el descenso del nivel se estabilizó, es decir cuando se tienen por lo menos tres lecturas de tiempo iguales o aparecidas con igual descenso de la columna de agua.

En el Anexo 6, se presenta los datos de campo de la prueba de infiltración, cuyos valores obtenidos del tiempo acumulado y la lámina infiltrada, se utilizó para la determinación de la curva de infiltración acumulada en la hoja de cálculo del programa Excel, la misma que determinó los parámetros a y b, correspondientes de la ecuación de la curva de $Icum = A * t^b$

Luego de encontrar la ecuación de la curva por el método gráfico, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$Icum = A * t^b$
$Icum =$ Infiltración acumulada, (mm)
$t =$ Tiempo, (min)

Velocidad de infiltración

Para ello se obtuvo derivando la ecuación de infiltración acumulada $Icum$ con respecto al tiempo y se multiplicó por un factor de conversión para llevarlo a horas.

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$VI = \frac{d\ Icum}{dt} = 60 * a * b * t^{b-1}$$
$$VI = 60 * a * b * t^{b-1}$$

$VI =$ Velocidad de infiltración, (mm/h o cm/min)
$b =$ Coeficiente sin dimensión, siempre es negativo y con valor, que van de 0 a -1.
$t =$ Tiempo de infiltración que viene, dado en horas o en minutos, (m)
$60 =$ Factor que transforma los minutos a hora, (h)

Velocidad de Infiltración básica

Se obtuvo reemplazando en la ecuación de velocidad de infiltración se tiene:

$VI = a * t^b$

$VIb = a * {t_{base}}^b$

$VIb = a * (-600 * b)^b$

$VIb =$ Velocidad de infiltración básica, (mm/h)

3.5.1.4. Diseño agronómico

El diseño agronómico se desarrolló en dos fases: Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos y determinación de los parámetros de riego (agua en el suelo).

3.5.1.4.1. Determinación de la evapotranspiración del cultivo

✓ **Evapotranspiración de referencia**

Se calculó la Et_0, del cultivo, por lo que se aplicó la ecuación empírica de Thorthwaite, la misma que se basa en valores de temperatura media del aire y la altitud.

Método de Thorthwaite

Se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$Et_0 = 16\left(\frac{l}{12}\right)\left(\frac{N}{30}\right)\left(\frac{10Ta}{I}\right)^a$$

De donde:

$Et_0 =$ Evapotranspiración potencial, (mm/mes)
$N =$ N° días en un mes
$Ta =$ Temperatura del aire media mensual (°C)
$a = 6{,}75\ x\ 10^{-7}\ I^3 - 7{,}71\ x\ 10^{-5}\ I^2 + 1{,}79\ x10^{-2}\ I + 0{,}49$
$l =$ Es un índice de calor anual, calculado como la suma de los doce índices mensuales i. Los índices i para cada mes y el valor de a se calculan como:
$I = \sum_1^{12} i$ *Para los 12 meses*
$i = \left(\frac{Ta}{5}\right)^{1{,}514}$

Para obtener los datos de temperatura, se extrapoló los datos de la estación meteorológica M770 Catacocha, por medio del gradiente altotérmico mediante la siguiente ecuación:

Determinación del gradiente altotérmico

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$T = T_{conocido} - \left(\frac{0{,}65}{100}\right) * (Altura_{Zona} - Altura_{Estación\ Conocida})$$

De donde:

Altitud Zona de estudio: 2 114 m.s.n.m

Altitud Estación conocida: 1 840 m.s.n.m

Los datos de temperatura, corresponde a los registros de la Estación completa M770 Catacocha, para el periodo de 24 años (serie 1985 -2009), actualizados hasta diciembre del 2009, en base a los registros originales (anuarios meteorológicos o en formato digital) del INAMHI. (Anexo 16).

- ✓ **Se determinó el coeficiente experimental kc del cultivo**

Se estableció el kc del cultivo según la fase de desarrollo, en la figura 9, se presentan lo coeficientes kc para cultivos perennes, en este caso se consideró el pasto.

Luego se calculó mensualmente, teniendo presente las cuatro fases que corresponden al ciclo vegetativo del pasto, su desarrollo es anual.

Procedimiento de cálculo del coeficiente del cultivo K_C:

- ✓ Se identificó las etapas de desarrollo del cultivo, la duración de cada etapa y la selección de los valores correspondientes de kc.

- ✓ Se construyó la curva del coeficiente del cultivo de la siguiente manera:

En el eje “x” el periodo de cada fase, correspondiente al número de días, de cada mes. Representado el ciclo vegetativo, y en el eje de las “y” los valores del coeficiente del cultivo K_C.

Con el valor del periodo de fase del eje “x”, se trazó una línea vertical, hasta topar la curva de kc y desde ahí, una línea horizontal hasta el eje de las ordenadas, lugar que se encontró, el valor del Kc buscado.

A partir del grafico se obtuvo, los valores kc de las fases del cultivo. Para ello se tomó en cuenta, que el número de días, que entren en el cálculo se refiera únicamente a los días que correspondan al ciclo vegetativo.

Mes	Caña	Alfalfa	Pasto	Vid	Cítricos	Frutales de hoja caduca	Frutales de hoja perenne
1	0.30	0.65	0.48	0.20	0.65	0.20	0.60
2	0.35	0.75	0.60	0.23	0.67	0.25	0.75
3	0.50	0.85	0.75	0.30	0.69	0.35	0.85
4	0.60	1.00	0.85	0.50	0.70	0.65	1.00
5	0.77	1.10	0.87	0.70	0.71	0.85	1.10
6	0.90	1.13	0.90	0.80	0.72	0.95	1.12
7	0.98	1.12	0.90	0.80	0.72	0.98	1.12
8	1.02	1.08	0.87	0.75	0.71	0.85	1.05
9	1.02	1.00	0.85	0.67	0.70	0.50	1.00
10	0.98	0.90	0.80	0.50	0.68	0.30	0.85
11	0.90	0.80	0.65	0.35	0.67	0.20	0.75
12	0.78	0.65	0.60	0.25	0.65	0.20	0.60

Figura 9. Presenta los coeficientes de cultivo para determinar la curva de crecimiento de algunos cultivos perennes (kc).

Fuente: (López, 2007)

- ✓ **Determinación de la evapotranspiración del cultivo Et_C:**

Recomendado por la FAO 56 (Doorenbos y Pruit, 1997), se calculó de la siguiente manera:

$ETc = ETo * kc$;

De donde:

$ETc =$ Evapotranspiración máxima del cultivo, mm/día

$ETo =$ Evapotranspiración potencial o de referencia, mm/día

$kc =$ Coeficiente de cultivo, adimensional

- ✓ **Índice de humedad**

Luego se procedió a la determinación de los meses de déficit y exceso de agua mediante el índice de humedad. Se usa como estimador de la humedad disponible, indicando la escasez de agua, si es menor a 1, o exceso de agua si es mayor que 1. Viene dado por la expresión:

$$I_h = \frac{P}{Eto};$$

De donde:

$I_h =$ Índice de humedad

$P =$ Precipitación media mensual, (mm)

$Eto =$ Evapotranspiración de referencia, (mm)

Los datos de precipitación, para determinar el índice de humedad, corresponde a los registros de la Estación Pluviométrica M760 Lauro Guerrero, para un periodo de 24 años (serie 1985 - 2009), actualizados hasta diciembre del 2009, en base a los registros originales (anuarios meteorológicos o en formato digital) del INAMHI[2]. (Anexo 16).

[2] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

3.5.1.4.2. Demandas de riego

Para ello se determinó: caudal continuo, caudal permanente, caudal de diseño y, volúmenes de agua.

a) Cálculo del caudal continuo

Se obtuvo mediante la siguiente expresión matemática:

$$q_c = \frac{ETc}{Efsistema*8{,}64};$$

De donde:

$q_c =$ Caudal continúo, (l/s/ha)
$Etc =$ Evapotranspiración del cultivo, (mm/día)
$Ef_{sistema} =$ Eficiencia del sistema de riego por aspersión, 75 %, (decimal)

b) Cálculo del caudal permanente

Se obtuvo la superficie de riego mediante la siguiente relación matemática:

$$q_p = S_r . q_c \ ;$$

De donde:

$q_p =$ Caudal permanente o disponible en la fuente de agua, (l/s)
$S =$ Superficie en, (ha)
$q_c =$ Caudal de continuo, (l/s/ha)

c) Cálculo del caudal de diseño

Este caudal de diseño, consistió en definir un factor de operación es decir la forma en que presente manejar el agua de riego en el sistema, el cual es consecuencia de: frecuencia de riego F_r, ciclo de riego C_r y tiempo de aplicación de riego T_r

Se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$Q_d = \frac{q_p}{F_o}\ ; \qquad F_o = \frac{C_r}{F_r} * \frac{\text{Nº Horas por día de riego/día}}{\text{Nº } Horas\ Totales\ del\ día}\ ;$$

De donde:

Q_d = Caudal de diseño, (l/s)
q_d = Caudal disponible, (l/s)
F_o = Factor de operación
C_r = Ciclo de riego, (día)
F_r = Frecuencia de riego, (día)
$Q_d > q_d$; Se establece dotar de un reservorio

3.5.1.4.3. Diseño del reservorio

El diseño del reservorio está en función del caudal de diseño Q_d.

Cálculo del caudal de diseño

El caudal de diseño $\boldsymbol{Q_d}$, sirvió en determinación del volumen del reservorio.
Se expresó mediante la siguiente formula:

$$Q_d = \frac{q_p}{F_o}\ ; \qquad F_o = \frac{C_r}{F_r} * \frac{\text{Nº Horas por día de riego/día}}{\text{Nº } Horas\ Totales\ del\ día}\ ;$$

De donde:

Q_d = Caudal de diseño, (l/s)
q_d = Caudal disponible, (l/s)
F_o = Factor de operación
C_r = Ciclo de riego, (día)
F_r = Frecuencia de riego, (día)
$Q_d > q_d$; Se establece dotar de un reservorio

a) Cálculo del volumen del reservorio

Se expresó mediante la siguiente fórmula:

$V_{reser} = q_p * N_{horas}$;

De donde:

V_{reser} = Volumen de almacenamiento, (m^3)
q_p = Caudal permanente es el disponible en la fuente de agua, (m^3/h)
N_{horas} = Número de horas de almacenamiento de agua, (h)

b) Dimensiones del reservorio

Se realizó en forma de pirámide truncada, por ajustarse a las condiciones que presento el lugar para su construcción. (Anexo 13). Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$V_{res} = \frac{h}{3}\left(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2}\right)$;

De donde:

V_{res} = Volumen del reservorio, (m^3)
A_1 = Área superior del reservorio, (m^2)
A_2 = Área inferior del reservorio, (m^2)
h = Altura del reservorio, (m)

3.5.1.4.4. Parámetros de riego

Para este parámetro se calculó las láminas de agua de riego y los intervalos de aplicación entre dos riegos consecutivos, correspondiente a la programación del riego, para ello se utilizó los respectivos resultados de las propiedades hidrofísicas del suelo, realizados en el laboratorio de suelos y aguas de la UNL. (Anexo 5).

- ✓ **La lámina de agua aprovechable**

Se utilizó la siguiente expresión matemática:

$$LAA = \left(\frac{\theta CC - \theta MP}{100}\right) * \frac{Da}{Dw} * D;$$

De donde:

$LAA =$ Lámina de agua aprovechable, (mm)
$CC =$ Contenido de humedad a capacidad de campo en base a peso, (%)
$PMP =$ Contenido de humedad a marchitez permanente en base a peso, (%)
$Da =$ Densidad aparente del suelo, (g/cm^3)
$Dw =$ Densidad del agua, (g/cm^3)
$D =$ Profundidad de suelo, (mm)

- ✓ **Lámina de agua rápidamente aprovechable**

Se utilizó la siguiente expresión matemática:

$$LARA = UR * \left(\frac{\theta CC - \theta MP}{100}\right) * \frac{Da}{Dw} * D;$$

De donde:

$LARA = LAA * UR$
$LARA =$ Lámina de agua rápidamente aprovechable, (mm).

$LAA =$ Lámina de agua aprovechable, (mm)

$UR =$ Umbral de riego, decimal, para pastos el UR es de aproximadamente del 60%, (decimal)

3.5.1.4.5. Frecuencia de riego

Se calculó de la siguiente manera:

$$F_r = \frac{LARA}{Etc_{max}};$$

De donde:

$F_r =$ Frecuencia de riego, (días)

$LARA =$ Lámina de agua rápidamente aprovechable, (mm)

$Etc_{max} =$ Evapotranspiración máxima del cultivo, (mm/día)

- ✓ **Frecuencia de riego ajustado**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$F_{rj} = Etc_{max} * \# \, días;$$

De donde:

$F_{rj} =$ Frecuencia de riego ajustada siendo la evapotranspiración del cultivo acumulada, (mm)

$Etc_{max} =$ Evapotranspiración máxima del cultivo, (mm/día)

$\# \, días =$ Número de días, (día)

✓ **Lámina de riego**

Se determinó mediante la siguiente relación:

$$L_r = \frac{F_{rj}}{Efa};$$

De donde:

$L_r =$ Lámina de riego ajustada, (mm)
$Etc_{max\ acum} =$ Evapotranspiración máxima del cultivo acumulada, (mm)
$Efa =$ Eficiencia del método de riego, por aspersión, 75 %, (decimal)

3.5.1.4.6. Selección del aspersor

El caudal de trabajo del aspersor, se consideró un caudal igual o aproximado al caudal de diseño $Q_{d=}$ 2,4 l/s, por ello se dirigió al catálogo de aspersores, para su respectiva selección, en el cual se definió un $Q_{asp=}$ 2,32 l/s, correspondiente a un mini caño (Senninger 8025 RD 2 1 ¼" M). (Anexo 9). Al seleccionar el aspersor, también se definió la línea de riego.

✓ **Número de posiciones del aspersor**

Se definió el maco de riego para lo cual se consideró: la forma del terreno y el 60 % del diámetro efectivo del aspersor seleccionado.

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$N_p = \frac{S_r}{M_r} = \frac{S_r}{E_{lat} * E_{asp}};$$

De donde:

$N_p =$ Número de posiciones, (Unidad)
$S_r =$ Superficie de riego, (m^2)

M_r =Marco de riego, (m^2)

E_{lat} = Espaciamiento entre lateral, (m)

E_{asp} = Espaciamiento entre aspersor, (m)

Para el marco de espaciamiento se consideró la recomendación por el fabricante del aspersor:

a) Se definió una distribución en cuadrado (30 x 30) m al ser el más utilizado para este sistema semifijo y recomendado por el fabricando del aspersor Senninger, para modelos de impacto serie 80 considera espaciamiento de: 30 m hasta 30,5 m, correspondientes a la distancia entre aspersores y laterales, en un marco cuadrado o triangular.

✓ **Intensidad de precipitación del aspersor**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$I_p = \frac{Q_d(LPS) * 3600}{M_r} = \frac{Q(LPS) * 3600}{E_{lat} * E_{asp}};$$

De donde:

Ph_r = Precipitación horaria, (mm/h)

Q_d = Caudal de diseño, (l/h)

E_{lat} = Espaciamiento entre lateral, (m)

E_{asp} = Espaciamiento entre aspersor, (m)

$I_P \leq VIB$

✓ **Tiempo de riego por posición**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$T_r = \frac{L_r}{I_p};$$

De donde:

T_r = Duración de cada posición, (horas h)

L_r = Lámina de riego, (mm)

I_p = Precipitación media, (mm/hora)

3.5.1.5. Propuesta para el manejo y operación del sistema de riego por aspersión

Se consideró los resultados del factor de operación de riego y la selección del aspersor, como los que se presenta a continuación:

Factor de operación de riego

Es consecuencia de los siguientes aspectos:

- F_r Frecuencia de riego, (días)
- C_r Ciclo de riego, (días)
- T_r Tiempo de horas riego, (horas)

Selección del aspersor

Es consecuencia de los siguientes aspectos:

- N_p Números de posiciones del emisor de riego.
- T_r Tiempo por posición de riego, (h)
- L_r Lámina de riego aplicada, (mm)
- I_p, Precipitación horaria del aspersor, (mm/h)

3.5.1.6. Diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión

Se determinó la red hidráulica del Sistema de riego, dimensiones de la red principal, secundaria, pérdidas de carga en las tuberías y accesorios.

Se empleó la fórmula Hazen – Williams aplicable para diferentes tipos de tuberías. Para el cálculo del diámetro de tubería más apropiado, se estimó por tanteos sucesivos hasta el encontrar el diámetro correcto, el cual está en función, de la longitud de tubería, caudal, velocidad.

Para realizar los cálculos hidráulicos se consideró los siguientes aspectos:

- ✓ Levantamiento topográfico de la superficie de riego (Anexo 10), presenta las curvas de nivel a cada metro, con esto se determinó los desnivel del terreno; además se presenta la ubicación de la fuente de agua, reservorio, distancias de cada trayecto de la conducción del agua de riego, hasta la superficie regable. En el (Anexo12), se presenta el plano del diseño de riego por aspersión.

3.5.1.6.1. Pérdidas de carga por fricción longitudinal

Ecuación de William – Hazen

Permitió determinar las pérdidas de por fricción de la tubería principal y secundaria, en las tubería de PVC y PE.

La ecuación hace referencia a lo siguiente:

$$hf = J * L\,; \quad J = 1{,}21 * 10^{10} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * D^{-4{,}87}$$

De donde:

$hf =$ Pérdida de carga en la tubería, (m)
$L =$ Longitud de la tubería, (m)

$J =$ Gradiente hidráulico, (m/ m)

El gradiente hidráulico está comprendido por:

$Q =$ Caudal transportado en la tubería, (l/s)
$C =$ Coeficiente de fricción, materiales plásticos para riego 150, (adimensional)
$D_{\emptyset} =$ Diámetro interior de la tubería, (mm)

La pérdida de carga unitaria

La pérdida de carga unitaria o el gradiente hidráulico (m/m) de la pérdida de carga por ficción (J) es igual a la pérdida de carga por fricción por metro y se expresa como se señala a continuación:

$$J = \frac{hf}{L}$$

La pérdida de carga por fricción (m) resulta de la forma siguiente:

$$hf = J * L; \quad reemplazando\ J = 1{,}21 * 10^{10} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * D^{-4{,}87};$$

Resulta la expresión de pérdida de carga:

$$hf = 1{,}21 * 10^{10} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * D^{-4{,}87} * L;$$

De donde:

$hf =$ Pérdida de carga por fricción, (m)
$J =$ Pérdida de carga unitaria o el gradiente hidráulico, (m/m)
$L =$ Longitud de la tubería, (m)

Otra forma de encontrar el gradiente hidráulico es mediante tablas comerciales de tubería; y de igual manera se puede calcular, el gradiente en J (m/100 m); y se determinó con la siguiente relación:

$$J_{m/100\,m} = 1{,}212 * 10^{12} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * D^{-4{,}87}$$

De donde:

Tiene las mismas unidades, el (Q, C y D) que la pérdida de carga unitaria; y la pérdida de carga por fricción de una tubería, se obtuvo al multiplicar por una longitud determinada (m), por lo tanto resultó ($hf = J_{m/100\,m} * L$).

Cálculo de la velocidad media

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

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

De donde:

$V =$ Velocidad media en la tubería, (m/s)

$Q =$ Caudal, de conducción en la tubería, (m^3/s)

$A =$ Área de la sección circular en la tubería, (m^2)

Por consiguiente el área de la sección trasversal corresponde a la siguiente expresión matemática:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

De donde:

$d =$ Diámetro interno en la tubería, (m)

3.5.1.6.2. Pérdidas de carga locales

Se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$Hm = \left(\sum km\right) * \frac{V^2}{2g};$$

De donde:

$Hm =$ Energía por unidad de peso perdida en el accesorio, (m)
$km =$ Coeficiente de pérdida menores del accesorio, (adimensional)
$V =$ Velocidad media del flujo en la tubería, (m/s)
$g =$ Aceleración de la gravedad, (9,81 m/s^2)

3.5.1.6.3. Pérdidas de carga en el lateral

Se empleó en primer lugar, el cálculo de la gradiente de la pérdida de por fricción (J) en la línea sin salidas múltiples, y luego su ajuste por la longitud de la tubería lateral (L), y la aplicación de un coeficiente de reducción (F) de Christiansen, basado en el número de salidas (aspersores) sobre la línea (n); para aquello se procedió:

El cálculo de perdida de carga en el lateral, se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$hf_L = J * L * F;$$

De donde:

$hf_L =$ Pérdida de carga en el lateral, (m)
$J =$ Pérdida de carga unitaria o el gradiente hidráulico, (m/m)
$L =$ Longitud de la tubería, (m)
$F =$ Coeficiente de Christiansen, (adimensional).

a) Coeficiente de Christiansen (F)

Este factor que depende del número de aspersores y de la distancia del primer aspersor al origen del lateral; puede ocurrir que esta distancia sea igual a la de otros aspersores (x=Sa), al inicio de la entrada del lateral, y a la mitad se ubica a (x = Sa/2).

Se aplicó la siguiente fórmula en el cual, el primer aspersor está ubicado a la distancia igual al espaciamiento del aspersor:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2};$$

De donde:

$F =$ El factor de Christiansen, es un coeficiente reductor que depende de N, m y tienen en cuenta la disminución del caudal a lo largo del ramal.
$N =$ Número de derivaciones
$m =$ Exponente de la velocidad en la fórmula de pérdidas de carga utilizada, PE = 1,75, PVC = 1,8

b) Condición de diseño

Dado que las condiciones topográfica del lugar, y el diseño hidráulico determinó que la perdida de fricción en el lateral (hf) es menor que el desnivel del lateral (Hg); dio como consecuencia el caso: donde el diseño de la lateral en forma descendete, corresponde a H_g (desnivel topografico) es > hf (pérdida de carga del lateral).

En este caso las diferencias de presión entre el primero y último aspersor en un lateral no deben exceder al 20 % de la presión media. Esta diferencia del 20% producirá una diferencia del 10% en el caudal de descarga.

A continuación se determinó la presión: al origen o mínima y presión máxima al final del aspersor:

a) Presión el origen o mínima

Se aplicó la siguiente fórmula:

$P_o = \frac{P_a}{\gamma} + \frac{3}{4}h - \frac{H_g}{2} + H_a$; El lateral es descendente con signo -.

De donde:

$\frac{P_o}{\gamma} =$ Presión en el origen del ramal, (m)

$\frac{P_a}{\gamma} =$ Presión normal en el aspersor, (m)

$h =$ Pérdida de carga en el lateral, (m)

$\frac{H_g}{2} =$ Desnivel geométrico entre los extremos del ramal, (m)

$H_a =$ Altura del tubo aspersor, (m)

b) Presión máxima o en el último aspersor

Se aplicó la siguiente fórmula:

$$\frac{Pn}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - \left(\frac{1}{4}\right)h + \frac{H_g}{2}$$

De donde:

$\frac{P_n}{\gamma} =$ Presión en el último aspersor, (m)

$\frac{P_a}{\gamma} =$ Presión en el aspersor, (m)

$h =$ Pérdida de carga en el lateral, (m)

$\frac{H_g}{2} =$ Desnivel geométrico entre los extremos del ramal, (m)

c) Para este caso está definida por la máxima diferencia de presión entre los aspersores extremos:

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta P = \frac{P_u}{\gamma} - \left(\frac{P_o}{\gamma} - H_a\right) = \left(H_g - h\right) \leq 0{,}2\frac{P_a}{\gamma}$$

De esta misma expresión se obtiene:

Presión en el último aspersor del lateral

$$\frac{P_{Ua}}{\gamma} = \frac{P_o}{\gamma} + \Delta P$$

Al tratarse de un lateral descendente, se presenta el caso donde el desnivel topográfico es mayor a la pérdida en el lateral (Hg > h), por lo que fue necesario graficar la curva característica del aspersor, y observar las presiones: presión al origen, presión mínima y presión final del aspersor, los mismos que modifican el caudal nominal de descarga, para ello se determinó:

d) Ecuación del emisor de riego

Para la determinación de la ecuación del aspersor Senninger modelo 8025 se analizó los valores de: caudales del aspersor y presiones de funcionamiento, valores dados por las especificaciones del fabricante cuadro 3, mediante aquello se generó la curva del emisor y se obtuvo la ecuación de tipo exponencial:

Se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q = KH^x$$

De donde:

$Q =$ Caudal emitido por el emisor, (l/s)

$H =$ Presión en las boquillas, (m)

$K\ y\ x =$ Características del aspersor, (m)

Cuadro 3. Especificaciones del aspersor Senninger 8025

H (presión de funcionamiento)	Q (caudal del aspersor l/s)
24	2,32
27	2,48
31	2,63
34	2,77
37	2,91
41	3,04
44	3,16
48	3,28
51	3,40

3.5.1.6.4. Presión total del sistema

La presión total para que funcione el sistema de riego, se calculó mediante la siguiente fórmula;

$$\mathrm{H}_T = \sum h_f + \sum h_m + hf_L + \mathrm{H}_{asp} + \mathrm{H}_{elev}\ ;$$

De donde:

$\mathrm{H}_T =$ Presión total del sistema, (m)

$\sum h_f =$ Pérdidas por fricción longitudinal de tubería, (m)

$\sum h_m =$ Pérdidas de carga menores, (m)

$\sum h_L =$ Pérdidas por fricción en el lateral, (m)

$\mathrm{H}_{\mathrm{asp}} =$ Presión de funcionamiento del aspersor, (m)

$\mathrm{H}_{\mathrm{elev}} =$ Altura del elevador, (m)

3.5.2. Metodología para el segundo objetivo

"Instalar un sistema de riego por aspersión para el cultivo de pasto en la finca Landapo".

Para el procedimiento de este objetivo se procedió a lo siguiente, pero antes de ello se detalla en:

- ✓ El (Anexo 15) se presenta el presupuesto del sistema de riego, en resumen la cantidad y especificaciones de materiales.

- ✓ Luego que se adquirió los materiales se realizó las siguientes actividades, para su respectiva instalación:

3.5.2.1. Replanteo de ubicación de la red hidráulica

- ✓ Se replanteo en el campo el diseño del sistema de riego, que se realizó en el plano (se dibujó el trazado y distribución de las líneas de riego). (Anexo 10 y12).

- ✓ Lo primero que se hizo es marcar en el campo el trazado de la tubería, por medio de estacas cada 10 metros, para la tubería principal y secundaria. (Anexo 8).

3.5.2.2. Instalación de la red de tuberías, accesorios complementarios y aspersor

- ✓ **Tubería principal**

En el primer tramo de 100 m, se efectuó labores de limpieza y desbroce, en esta zona, se presentó características de cobertura vegetal arbórea desde el reservorio, hasta el inicio de la zona de riego.

En este trayecto se decidió por la instalación de tubería de polietileno PE, por su característica de flexibilidad, la que se pudo ajustarse a las condiciones del terreno y a la dirección de la conducción.

- ✓ **Tubería secundaria**

Se realizó la excavación de zanjas a la profundidad de 25 cm, en la distancia de 85 m, para la respectiva instalación de la tubería de policloruro de vinil PVC. En esta tubería, funcionó como la línea de riego.

Las zanjas tuvieron una pendiente constante, para minimizar el aire atrapado, marcando los puntos altos de la línea de conducción. Esta fue uniforme, libre de cascajo y lo suficiente ancha, para colocar correctamente el tubo y sostenerlo sobre todo su largo. (Anexo 8).
El material desalojado, se utilizó para relleno de la zanja y se compactó, minimizando los asentamientos sobre la tubería. Al empezar el rellenó inicial, se colocó de tal forma que el tubo no se desplace, deforme o dañe.

El sistema de riego es del tipo semifijo: el cual consta de una línea de riego correspondiente a la tubería secundaria enterrada, con sus respetivos elevadores de riego y el único elemento móvil que se cambia es el aspersor. (Anexo 12).

Se instaló los implementos de riego, que facilitó la conducción y distribución del agua, como también el control del sistema, entre los cuales se adquirió: (Anexo 8).

- ✓ Tuberías de polietileno Pe y policloruro de vinil PVC
- ✓ Conexiones (codo, adaptador, uniones, Tee reductora).
- ✓ Válvulas (retención, de paso de agua).
- ✓ Aspersor (elevador, adaptador).

3.5.2.3. Estructura de almacenamiento

- ✓ Se realizó en la cota 2107 m.s.n.m es el lugar más alto sobre la superficie de riego, esta se encuentra en la cota al inicio de riego 2075 m.s.n.m, por lo tanto la diferencia de cotas se obtuvo una carga hidráulica de 32 m, y al final de la cota de riego 2065 m.s.n.m, resultó una carga de 42 m.

- ✓ El reservorio se construyó en tierra, para almacenar un volumen de riego de 15.66 m^3; se efectuó la excavación manual de 16,62 m^3, en un material Fo Ac (suelo franco arcilloso); y

se dejó un talud de 63 º a cada lado de las paredes, recomendado para la estabilidad del suelo.

- ✓ En la base del reservorio se dejó pendientes del 1%, para que el agua almacenada, fluya sin ninguna dificultad hacia la válvula Check, donde se extrae el agua para riego, mediante un sifón. (Anexo 13).

- ✓ Se recubrió con geomembrana plástica, la superficie de 56 m^2, está incluido las respectivas zanjas de 0.50 m x 0.30 m para el anclaje y sus respectivos dobleces del plástico.

- ✓ Para el sistema de salida del agua del reservorio, hacia la válvula de paso se realizó por medio de un sifón. (Anexo 9).

3.5.3. Metodología para el tercer objetivo

"Evaluar la uniformidad de aplicación del agua por los emisores de riego"

Se determinó si los coeficientes de uniformidad de riego Cu y UD, aplicados mediante riego, por parte del aspersor seleccionado, están dentro de los límites aceptados de operación.

✓ **Procedimiento**

Se evaluó el aspersor de riego en cada posición cubriendo el área mojada por el aspersor, se colocó 28 recipiente de igual capacidad, forma y tamaño en los cuales se recolectó los volúmenes de agua, en el área evaluada, separados a 3 m entre cada pluviómetro. Tal como se muestra en la figura 10, (Anexo 14).

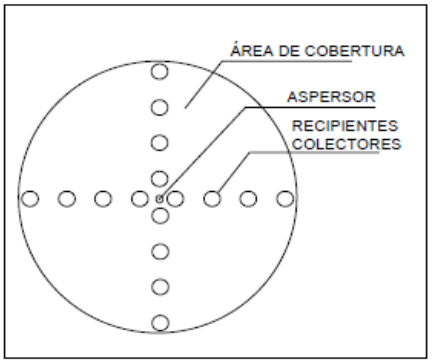


Figura 10. Esquema de los recipientes para la toma de lecturas, del agua aplicada por el aspersor

La distancia entre aspersores es de 30 m, se tomó la presión de funcionamiento del aspersor durante el experimento y su diámetro de humedecimiento.

Se midió el área del pluviómetro y el volumen en cm^3 recogido durante el ensayo de 40 min. Luego se encontró la lámina infiltrada.

Por ello se aplicó la siguiente expresión matemática:

$$Lámina = \frac{V}{A}$$

De donde:

$Lámina =$ Lámina infiltrada, (mm)
$V =$ Volumen del pluviómetro, (cm^3)
$A =$ Área del pluviómetro, (cm^2).

Luego la lámina infiltrada corresponde al tiempo de ensayo de la prueba 40 min, por ello se consideró de acuerdo a lo expuesto por Fischer y Wallender 1988 (citado por Tarjuelo & Benito, 2005) señala los tiempos de ensayo:

- Tiempo de ensayo de 40 minutos para pluviometros de diámetro de 12,7 cm.
- Tiempo de ensayo de 15 minutos para pluviometros de diámetro de 23,5 cm.

Luego con el tiempo de ensayo de 40 minutos, sirvió en la determinación de la precipitación horaria en mm/h.; $pp = \frac{mm}{h}$

✓ Tarjuelo (1991), se refiere al material necesario para la evaluación; (Anexo 14).

- Vasos pluviométricos de forma cilíndrica y tamaño uniforme, de una altura de 12 cm y diámetro mínimo de 8,5 cm, teniendo en cuenta que la precisión de la medida aumenta con el diámetro del pluviómetro.
- Tiempo del ensayo 40 minutos.
- Manómetro de glicerina, con su respectivo acoplamiento, se tomó la lectura de la presión en el elevador.
- Probeta graduada de 250 ml.
- Cinta métrica de 25 a 50 m.

3.5.3.1. Determinación del coeficiente de uniformidad (CU)

Se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$C_u = 100\left[1 - \frac{\sum(L-m)}{\sum L}\right]$$

C_u = Coeficiente de uniformidad, (%)

L = Valor de cada una de las lecturas, (mm)

m = Valor medio de las lecturas, (mm)

n = Número de lectura

$\sum(L-m)$ = Suma de los valores absolutos de las diferencias $(L-m)$

$\sum L$ = Suma de todas las lecturas, (mm)

3.5.3.2. Determinación de la uniformidad de distribución (UD)

Se expresó mediante la siguiente fórmula:

$$Ud = \frac{\text{Promedio del 25\% de las lecturas registradas por los pluviometros con los valores mínimos}}{\text{Lámina promedio registrada por los pluviómetros}} * 100$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados para el primer objetivo

"Diseñar un sistema de riego por aspersión para el cultivo de pasto en la finca Landapo".

4.1.1. Fuente de agua

En la finca "Landapo", la fuente de agua se encontró, ubicada en un acuífero libre, en estrato de material impermeable; como la arcilla, limos, que impide infiltrarse el agua en el suelo. (Anexo 1)

Este acuífero libre se ha formado por los escurrimientos superficiales de las aguas lluvia en la época de invierno, en los meses (diciembre a mayo), que se infiltran, en su mayor parte aguas arriba del acuífero.

Se evaluó la disponibilidad de agua mediante el aforo volumétrico, obteniendo el siguiente resultado:

Caudal: época de estiaje 0,1 l/s y en época de invierno 0.5 l/s.

Se captó el acuífero libre mediante una estructura sencilla de mampostería de piedra con recubrimiento de cemento, en el mismo se tiene dos salidas de tubería de PE; la primera es de 25 mm para el lavado, y la segunda 20 mm, que transporta el caudal disponible de 0,1 l/s hacia el reservorio.

4.1.2. Levantamiento planímetro de la superficie a regarse

El mapa topográfico presenta curvas de nivel a cada metro, el área de riego de 0,35 ha y plano de diseño del sistema de riego (trazado de la red de tubería y distribución de los aspersores), cuya información a detalle se presenta en el **(**Anexo 10 y 12**).**

4.1.3. Estudio de suelos

El estudio de suelos presentó: el contenido de agua en el suelo, las clases texturales y el contenido de materia orgánica.

4.1.3.1. Constantes hidrofísicas del suelos

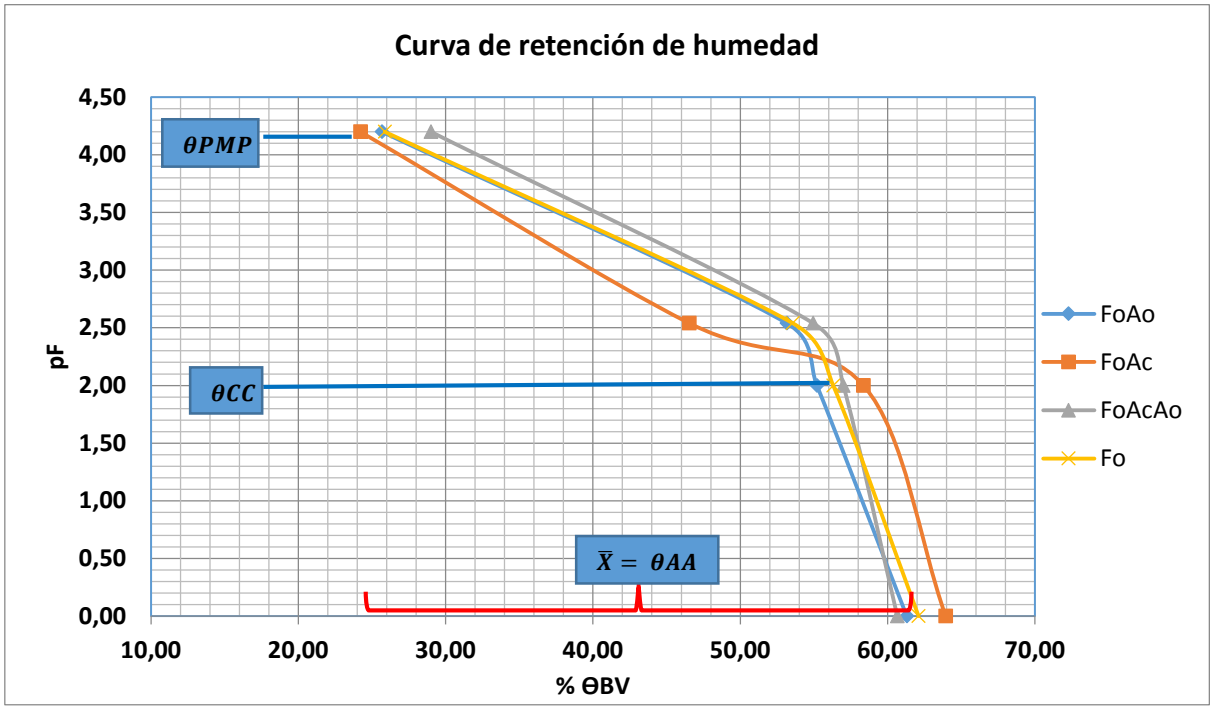


Figura 11. Curva de retención de los suelos del área de riego de la "Finca Landapo"

La figura 11, presenta la retención de agua en el suelo y el cuadro 4, los valores que se consideró para la construcción de la curva y representación de las condiciones físicas del suelo; las cuales corresponde al análisis de las muestras inalteradas, tomadas a la profundidad de 20 cm; y el uso actual del suelo: pasto cultivado.

Cuadro 4. Evaluación de las condiciones hidrofísicas del suelo de la Finca Landapo, con un pF 2 a capacidad de campo y los contenidos de humedad % base volumen

Textura	Saturación	CC 1/10 atm	CC 1/3 atm	PMP 15 atm	Volumen total de sólidos VTS	Volumen total de poros VTP	Capacidad de aireación CA	Agua aprovechable AA	Volumen Físicamente Inerte VFI
	pF 0	pF 2	pF 2,52	pF 4,2	%				
Fo Ao	61,57	55,45	53,39	25,79	38,43	61,57	6,12	29,66	64,22
Fo Ac	63,77	58,2	55,69	24,14	36,23	63,77	5,57	34,06	60,37
Fo Ac Ao	60,77	57,11	55,05	29,06	39,23	60,77	3,66	28,05	68,29
Fo	61,89	56,12	53,38	25,78	38,11	61,89	5,77	30,34	63,89
Promedio	**62,00**	**56,72**	**54,38**	**26,19**	**38,00**	**62,00**	**5,28**	**30,53**	**64,19**

El θbv_{sat} es 62 %, este valor se clasificó como muy alta, corresponde al volumen total del espacio poroso ocupado en el suelo, y un 38 % de volumen total de los sólidos, se encuentra retenido con una fuerza de succión pF = 0. Representan buena retención del agua en el suelo, pero mala aireación.

El θbv_{CC} es 56,72 %, este valor se clasificó como muy alta, corresponde a la cantidad de agua que permanece en el suelo, una vez que el flujo gravitacional ha cesado, y empieza a estabilizarse. Esta situación es muy favorable para el desarrollo del cultivo.

El θbv_{PMP} es 26,19 %, este valor se clasificó como muy alta, corresponde a la cantidad de agua del suelo, cuando las plantas se marchitan permanentemente.

El contenido de agua aprovechable AA de 30,53 %, se clasifica como muy alto, corresponde a la cantidad de agua fácilmente disponible para el desarrollo de la planta.

La capacidad de aireación se clasifica como baja con un valor de 5.28 %, se ve reflejado en el volumen total de poros del 62 % el cual, representa buena retención de agua en el suelo, pero mala aireación, al ser desplazado el aire de los macroporos por el agua.

Según Valarezo et al. (1998), considera que la porosidad de aireación del 10 al 15 % es satisfactoria, para el normal crecimiento de las plantas.

La densidad aparente del suelo es de 0.92 g/cm^3, corresponde a suelos orgánicos o no cultivado. Este valor es afectado por el contenido de materia orgánica, que se obtuvo de 6,48 a 8,20%, clasificándose como alto. Lo cual coincide con la afirmación de Iñiguez (1999), que el alto contenido de materia orgánica incide en valores bajos de la densidad aparente.

Estos resultados se puedo contrastar con lo que afirma Gómez (2014), para el uso de suelo, tierra de pastoreo: tasa de infiltración 0,20 a 6,74 cm/h, textura franco a franco arenoso, contenido de humedad de 13,75 a 93,74 %, densidad aparente 0,55 a 1,30 g/cm^3 y la porosidad 20,83 a 49,01 %, se presentan en pastos recientes y pradera nativa.

4.1.3.2. Textura del suelo

En la figura 12, se presentó el mapa de clases texturales del suelo en la zona de riego, correspondiente a textura media: franco arenoso F_o A_o; franco arcilloso F_o A_c; franco arcilloso arenoso F_o A_c A_o y franco A_o.

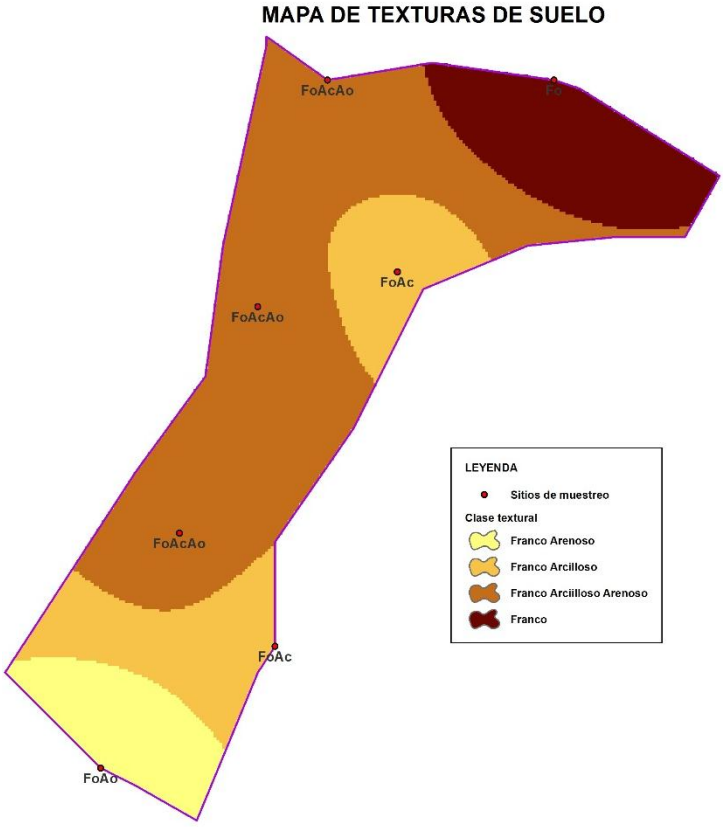


Figura 12. Mapa de texturas del suelo en la "Finca Landapo", muestras tomadas a 20 cm de profundidad.

Comparando con texturas gruesas las partículas del suelo son más grandes, tienen predominancia de macroporos, y se manifiesta en el movimiento rápido del aire y agua, y deben ser regadas con mayor frecuencia.

Según Iniguez (2005), los suelos de textura media, las partículas de suelo se encuentra íntimamente unidas entre sí, lo que permite el movimiento del agua y aire sea más lento a través de los microporos; en comparación con particulas de arena no se acoplan estrechamente, dejando pocos microporos para que se aloje una pequeña cantidad de aire y agua, por lo tanto retienen pequeñas cantidades de agua.

4.1.3.3. Materia orgánica

El suelo del área de riego presentó un contenido de materia orgánica del 6,48 a 8,20%, por lo que se clasifica como alta. El alto contenido de MO tuvo una fuerte incidencia sobre las propiedades físicas del suelo y la retención de humedad, entre las cuales influyó: a la porosidad del 62%, densidad aparente 0,92 g/cm^3, contenido de agua aprovechable 30,53 % y velocidad de infiltración 19,69 mm/h.

Lo cual coincide con la afirmación de Iñiguez (1999)**,** que suelos con altos contenidos de materia organica tiene relación en la disminución de la densidad aparente e incremento de su porosidad, y un adecuado contenido de humedad que permite un normal desarrollo de las raíces y de la planta en general.

También Valarezo et al (1998) afirma que el aumento de la materia organica del suelo, se refleja en el incremento de la capacidad total de retención de agua e influye sobre la curva de retención de humedad del suelo.

4.1.3.4. Evaluación de las condiciones físicas del suelo

- ✓ Para tal evaluación se consideró los siguientes resultados; capacidad de aireación CA 5,28%; inversamente el agua aprovechable AA 30,53 % y el volumen de poros físicamente inerte VFI 64,19% (el cual consideró el volumen total de los sólidos VTS 38% más el volumen inútil de los poros, siendo el valor de punto marchitez permanente PMP 26,19%); permitió clasificar la condición física del suelo.

- ✓ Se encontró dentro de la ZONA II, de acuerdo al diagrama triangular en esta zona denominada como pobre; al no permitir condiciones favorables para la germinación de las semillas y un buen enraizamiento de la planta y el movimiento del agua y aire es muy lento. (Anexo 5).

- ✓ Estas condiciones se dan en los meses de exceso de agua (diciembre a mayo), mientras que en época de sequía (junio a noviembre), las condiciones son favorables para el desarrollo de la planta, pero se encuentra limitada por la falta de agua de riego.

4.1.4. Velocidad de infiltración del agua en el suelo

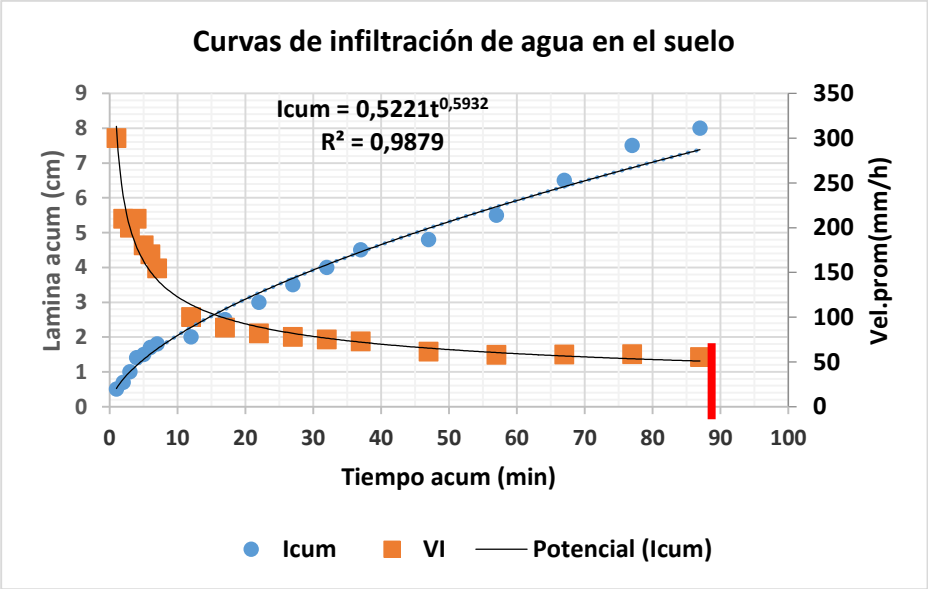


Figura 13. Curvas de infiltración del agua en el suelo y presenta la ecuación de infiltración acumulada Icum.

La curva de infiltración de agua en el suelo de la figura 13, presentó los siguientes resultados: se representó la velocidad de infiltración promedio la cual indica: que al iniciar el proceso de mojado del suelo es de 300 mm/h a medida que va disminuyendo el suelo se va mojando hasta llegar a una velocidad promedio de 55,2 mm/h para el tiempo de 90 min.

También se obtuvo la ecuación de infiltración acumulada $Icum = 0.5221 * t^{0.5932}; mm\,; t = min$; esta se derivó $Icum$ que permitió obtener la velocidad de infiltración básica $VIb =$

$19{,}85\ mm/h$, y el tiempo promedio básico resultó de 244,08 minutos; para los cálculos obtenidos se aplicaron las siguientes fórmulas:

a) Se determinó la velocidad de infiltración para ello se derivada la ecuación de $Icum = 0{,}5521 * t^{0.5932}; cm/min\ ; t = min$

$$VI = \frac{d\ Icum}{dt} = 60 * a * b * t^{b-1}$$

$$VI = 60 * 0{,}5521 * 0{,}5932 * t^{0{,}5932-1}$$

$VI = 18{,}58 * t^{-0{,}4068}; cm/hora;\ t = hora$: resultó la ecuación de velocidad de infiltración.

b) Se determinó la velocidad de infiltración básica para ello se aplicó las siguientes fórmulas: [3]$t_{base} = (-600 * b)\ ;\ t = min$; El tiempo base se reemplazó en el tiempo de la velocidad de infiltración;

$$VIb = 18{,}58 * {t_{base}}^{-0{,}4068}; cm; t = hora$$

$$VIb = 18{,}58 * (-600 * -0{,}4068)^{-0{,}4068}; cm;\ t = hora$$

$$VIb = 1{,}98\ cm/h$$

$$VIb = 19{,}85\ mm/h$$

La $VIb = 19{,}85\ mm/h$, corresponde a la clase textural de un suelo franco arenoso y la capacidad de infiltración básica se clasifico como media comprendida entre los rangos (15 a 28 mm/h); y resultó en un tiempo promedio t_{base} de 244,08 min

Se pudo comprobar que la precipitación horaria del aspersor de 9.28 mm/h, es menor que 19,85 mm/h de la VIb, el cual no afecta a las propiedades físicas del suelo, por lo tanto es un criterio esencial para definir la intensidad de riego, que evita aplicaciones deficientes o excesos de agua, que puedan someter el cultivo a estrés hídrico o favorece a la formación del proceso de escorrentía superficial (Orjuela, Rubiano, & Camacho, 2010).

[3] El tiempo básico corresponde cuando la velocidad de cambio de entrada para un período estándar de 10% o menos de su valor la infiltración se mantiene constante.

4.1.5. Diseño agronómico

4.1.5.1. Determinación de la evapotranspiración del cultivo

Cuadro 5. Evapotranspiración Potencial Según Thorthwaite, de la estación meteorológica Catacocha (período 1985 – 2009).

COD	ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
M770	CATACOCHA													
1	Días del Mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
2	Duración del día (hora)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
3	Temperatura Media (°C)	15,7	15,7	15,5	15,8	16,2	16,4	16,6	16,6	16,8	16,8	16,5	16,4	16,2
4	Índice Calórico mensual (i)	5,6	5,6	5,5	5,7	5,9	6,0	6,1	6,1	6,3	6,3	6,1	6,0	5,9
5	Índice Calórico anual (I)	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4	71,4
6	Constante depende lugar (a)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
7	ETo M. Thornthwaite (mm/mes)	57,29	57,29	56,11	57,88	60,28	61,49	62,71	62,71	63,94	63,94	62,10	61,49	60,58
8	ETo M. Thornthwaite (mm/día)	1,85	2,05	1,81	1,93	1,94	**2,05**	**2,02**	**2,02**	**2,13**	**2,06**	**2,07**	1,98	1,99

El cuadro 5, presenta los resultados de la demanda de evapotranspiración de referencia Et_o;

Se obtuvo la máxima demanda de agua, correspondientes a los meses secos de junio a noviembre, valores comprendidos entre 2,05 mm/día a 2.07 mm/día, su valor máximo es de 2,13 mm/día para el mes de septiembre. En los meses lluviosos de diciembre a mayo, valores comprendidos entre 1,81 a 2,05 mm/día.

Según FAO 56 (2006), al estimar con datos climáticos la Et_o, se determina la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independiente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo.

- ✓ **Curva del coeficiente del cultivo kc**

En la Figura 14, presentan los coeficientes del cultivo del pasto, en sus diferentes fases de desarrollo. Se observa que, en la etapas de menor desarrollo se presentó un kc_{ini} de 0.48, mientras que su máximo desarrollo presentó un kc_{med} de 0.90, coeficientes que influyen en la determinación de la Et_c siendo la cantidad real de agua que necesita, en sus diferentes etapas fenológicas. kc_{med}

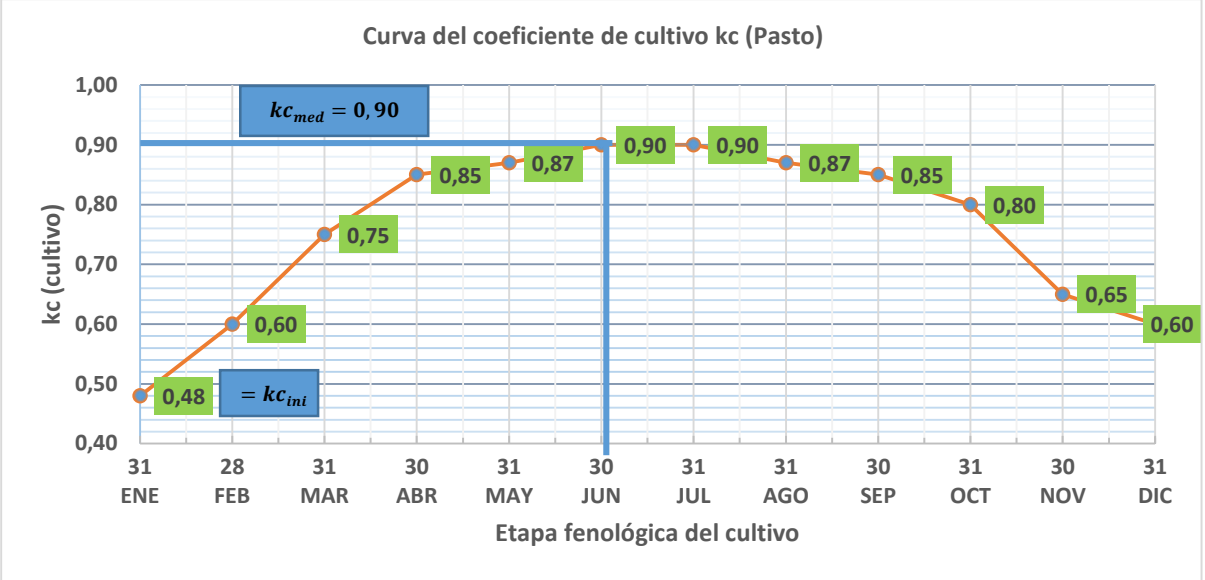


Figura 14. Cálculo del coeficiente del cultivo Kc del pasto

Fuente: (López, 2007)

En el cuadro 6, presenta los resultados de la cantidad de agua que requiere el pasto para su normal desarrollo en las diferentes etapas fenológicas y también se indicó los meses de déficit y exceso de agua mediante el índice de humedad.

Cuadro 6. Determinación de la máxima demanda de ET_c evapotranspiración del pasto

CULTIVO PASTOS	MESES												TOTAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Días del Mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
PP (mm/mes)*	246	317	325	187	72,7	18,3	5,9	1,9	7,6	30,2	28,4	104	1345,1
ETo (mm/mes)	57,29	57,29	56,11	57,88	60,28	61,49	62,71	62,71	63,94	63,94	62,10	61,5	727,2
kc	0,48	0,60	0,75	0,85	0,87	0,90	0,90	0,87	0,85	0,80	0,65	0,60	9,1
Etc (mm/mes)	27,50	34,37	42,08	49,20	52,44	55,34	56,44	54,56	54,35	51,15	40,36	36,89	554,7
Etc (mm/día)	-	-	-	-	-	**1,84**	1,82	1,76	1,81	1,65	1,35	-	18,2
Índice Humedad I_h	**4,30**	**5,54**	**5,79**	**3,24**	**1,21**	0,30	0,09	0,03	0,12	0,47	0,46	**1,69**	2,42

* Datos de precipitación media mensual, tomados de la estación pluviométrica Lauro Guerrero período de estudio (1985 -2009).

Se presenta una precipitación promedio anual de 1345.1 mm, su distribución no es uniforme a largo del año, esto se lo pudo comprobar, con el índice de humedad, que se obtuvo al relacionar la precipitación promedio mensual y la evapotranspiración de referencia. Este índice permitió determinar los periodos de exceso de agua cuando los valores son mayores a 1, en los meses: diciembre a mayo y el déficit de agua valores inferiores a 1, para los meses; junio a noviembre,

consecuentemente este parámetro de humedad permite planificar los cultivos bajo riego y temporal.

Los meses más secos, presenta menores valores de lluvia en; julio 5,9 mm, agosto 1.9 mm y septiembre 7.6 mm; es indispensable la aplicación de agua de riego, en estos meses de máxima demanda del cultivo.

4.1.5.2. Demandas de riego

En el cuadro 7, se presentó la necesidad de riego para el cultivo de pasto, el cual contiene los siguientes resultados:

Cuadro 7. Determinación de riego para el cultivo de pasto

VARIABLE	MESES												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Días del Mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
Etc (mm/mes)	27,50	34,37	42,08	49,20	52,44	55,34	56,44	54,56	54,35	51,15	40,36	36,89	554,68
Etc (mm/día)	0,89	1,23	1,36	1,64	1,69	**1,84**	1,82	1,76	1,81	1,65	1,35	1,19	18,23
Efa 75%	-	-	-	-	-	75	75	**75**	75	75	75	-	-
q, l/s/ha/día	-	-	-	-	-	**0,28**	**0,28**	**0,27**	**0,28**	**0,25**	**0,21**	-	-
Vol, m³/ha/día	-	-	-	-	-	24,60	24,27	23,47	24,15	22,00	17,94	-	136,43
Vol, m³/ha/mes	-	-	-	-	-	737,86	752,51	727,42	724,64	682,02	538,18	-	4162,63
Caudal disponible = 0,1 l/s													
Sr	-	-	-	-	-	**0,35**	0,36	0,37	0,36	0,39	0,48	-	-
Vol, m³/ha/día	-	-	-	-	-	8,64	8,64	8,64	8,64	8,64	8,64	-	51,84
Vol, m³/ha/mes	-	-	-	-	-	259,20	267,84	267,84	259,20	267,84	259,20	-	1581,12

En la finca de estudio el patrón de cultivo es el pasto, por lo cual, se diseñó el sistema de riego teniendo en cuenta el valor de máxima demanda de Et_c 1,84 mm/día en el mes de junio, se aplicó la eficiencia del 75% correspondiente al método por aspersión y se determinó la superficie de riego de acuerdo al caudal disponible de 0,1 l/s.

Se obtuvo el volumen de agua para su máximo desarrollo en el mes de junio, el cual necesita 737,36 m^3/ha/mes y un total en todo el periodo de déficit de agua, desde junio a noviembre de 4162,63 m^3/ha; y para la superficie de 0,35 ha se requiere un volumen de 259,20 m^3/ha/mes y 8,64 m^3/día, y un total en el periodo de estiaje de 1581,12 m^3.

A continuación se presentó los cálculos de: caudal continuo, superficie de riego y caudal de diseño:

- ✓ **Cálculo del caudal continuo**

El cual se obtuvo con la siguiente expresión:

$$q_c = \frac{Etc_{máx}}{Ef\ sistema\ * 8{,}64}$$

$$q_c = \frac{1{,}84\ mm/día}{0{,}75\ * 8{,}64}$$

$$q_c = 0.28\ (l/s/ha)$$

Este caudal se considera las 24 horas del día; su máximo desarrollo del cultivo 1,84 mm/día **y** la eficiencia de riego 75%, resultó un caudal continuo de 0,28 l/s/ha.

- ✓ **Caudal permanente o disponible q_p**

Este caudal permitió determinar la superficie de riego, se obtuvo con la siguiente expresión:

$$q_p = Sr * qc$$

$$S_r = \frac{q_d}{q_c}$$

$$S_r = \frac{0{,}1\ l/s}{0{,}28\ l/s/ha}$$

$Sr = 0{,}35\ ha$; es la superficie que se puede regarse con el caudal disponible q_d de 0,1 l/s; luego conociendo la superficie de riego se asume un **factor de operación** es decir la forma en que se pretende manejar el agua de riego en el sistema. Por ello se definió mediante la ecuación del caudal de diseño:

✓ **Caudal de diseño**

Se calculó mediante la siguiente expresión matemática:

$Q_d = \frac{q_p}{F_o}$; $F_o = \frac{C_r}{F_r} * \frac{\text{Nº Horas por día de riego/día}}{\text{Nº } Horas\ Totales\ del\ día}$;

$$Q_d = \frac{0{,}1}{\frac{1}{2} * \frac{2}{24}}$$

$Q_d = 2{,}4\ l/s > q_d = 0{,}1\ l/s$, el caudal de diseño es mayor al disponible, por ello se optó por la construcción de un reservorio, y corresponde a un volumen almacenado en dos días de 17,28 m^3, es decir para la superficie de riego de 0,35 ha, se requiere un volumen diario de 8,64 m^3/día y en 2 días resultó 17,28 m^3 que debe ser aplicado mediante riego.

En este caudal de diseño se definió la frecuencia de riego de 2 días, con un ciclo de 1 día y un tiempo de aplicación de 2 horas, cuya información es la base de todo del sistema de rieg**o**.

4.1.5.3. Diseño del reservorio

El diseño del reservorio está relacionado con el **caudal de diseño del sistema.**

Se estableció de la siguiente relación de caudal:

$Q_d = 2{,}4\ l/s > q_d\ 0{,}1 l/s$. El caudal de diseño es mayor al caudal disponible, por ello se optó por la construcción de un reservorio y de acuerdo a este valor, se consideró un caudal igual o aproximado para la selección del aspersor, el cual resultó un caudal del aspersor de 2,32 l/s, por ello se consideró en los próximos cálculos como el caudal de diseño Q_d y la determinación de la red hidráulica, y volumen de aplicación de riego en un tiempo determinado.

a) Dimensiones del reservorio (Anexo 13)

El volumen de riego resultó de la siguiente relación: el caudal del aspersor Q_d 2,32 l/s y tiempo de aplicación total de riego de 2 horas resultó el volumen de 17 m^3, necesario para regar la superficie de 0.35 ha. A continuación se determinó la dimensión del reservorio:

Volumen de almacenamiento

Se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$V_{Talm} = \frac{h}{3}\left(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2}\right)$$
$$V_{Talm} = \frac{1{,}15\ m}{3}\left(18{,}84\ m^2 + 9\ m^2 + \sqrt{18{,}84\ m^2 * 9\ m^2}\right)$$
$$V_{Talm} = 15{,}66\ m^3$$

Se obtuvo el volumen máximo de almacenamiento en el reservorio de 15,66 m^3, a la altura de 1,15 m; para ello se llenó con una frecuencia de riego de 2 días en un tiempo de 43,5 horas, considerando el caudal disponible de 0,1 l/s, en ese momento se utilizó el agua de riego y, luego se almacenó en un tiempo de 4,5 horas cuyo volumen resultó de 1,62 m^3, con lo que se completó el volumen necesario de riego de 17,28 m^3.

Volumen de excavación

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$V_{Texca} = \frac{h}{3}\left(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2}\right)$$
$$V_{Texca} = \frac{1{,}20\ m}{3}\left(19{,}36\ m^2 + 9\ m^2 + \sqrt{19{,}36\ m^2 * 9\ m^2}\right)$$
$$V_{Texca} = 16{,}62\ m^3$$

El volumen de excavación del reservorio de V_{exca} $16{,}62\ m^3$, a la altura de 1.20 m, siendo un volumen manejable para el movimiento de tierra en forma manual.

4.1.5.4. Parámetros de riego

Se consideró los resultados de las constantes hidrofísicas del suelo, realizados en el laboratorio de suelos y aguas de la UNL. (Anexo 5), a continuación se detallan los cálculos:

- ✓ **Lámina de agua aprovechable**

Los valores de contenido de humedad del suelo se consideró en base a peso.

Se determinó con la siguiente fórmula:

$$LAA = \left(\frac{\theta CC - \theta MP}{100}\right) * \frac{Da}{Dw} * D$$

$$LAA = \left(\frac{61{,}91-28{,}47}{100}\right) * 0{,}92 * 500 \text{ mm}$$

$$LAA = 154\ mm$$

- ✓ **Lámina de agua rápidamente aprovechable**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$LARA = LAA * UR$$

$$LARA = 154\ mm * 0{,}6$$

$$LARA = 93\ mm$$

El valor de LARA del 93 mm corresponde a un alto contenido de humedad disponible en el suelo.

- ✓ **Frecuencia de riego**

Se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$F_r = \frac{LARA}{Etc_{max}}$$

$$F_r = \frac{93\ mm}{1{,}84\ mm/día}$$

$$F_r = 50\ días$$

La frecuencia de riego calculada es demasiado alta, entre el número de riegos cada 51 días, por lo que se optó en realizar un ajuste, lo cual corresponde a un **manejo práctico del agua de riego.**

- ✓ **Frecuencia de riego ajustado**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$F_{rj} = Etc_{max} * \#\ días$$

$$F_{rj} = 1{,}84 \frac{mm}{día} * 2\ días$$

$$F_{rj} = 3{,}68\ mm$$

Se obtuvo la $Etc_{max\ acum}$ máxima el cultivo de 3,68 mm para 2 días, con un UR de 2,4 %, tal como muestra la figura 15.

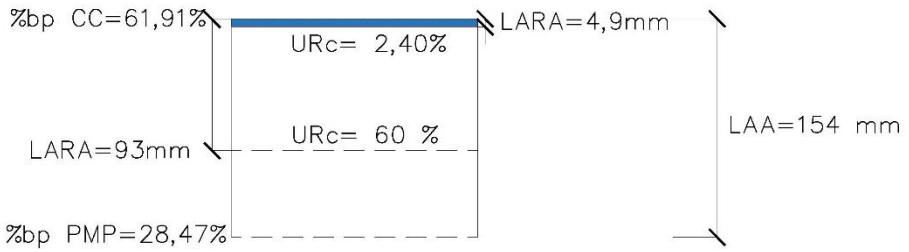


Figura 15. Frecuencia de riego ajustada de 2 días, se aplica una lámina de riego 4 ,90 mm y UR 2,4 %.

Este valor de UR 2.4%, el suelo se encuentra con un alto contenido de humedad no recomendable para la condición de pastoreo; por ello se optó en realizar una propuesta para el manejo práctico del agua de riego, en condiciones de humedad adecuada al suelo, que posteriormente se detalla.

✓ **Lámina de riego**

Se determinó con la siguiente fórmula:

$$L_r = \frac{Etc_{max\ acum}}{Efa}$$

$$L_r = \frac{3{,}68\ mm}{0{,}75}$$

$$L_r = 4{,}9\ mm$$

Se aplicó la eficiencia del 75% correspondiente al método por aspersión, mediante esta lámina de riego se repone una lámina mayor (L_r 4,9 mm) a la requerida por el cultivo $Etc_{max\ acum}$3,68 mm.

La lamina de riego L_r 4,9 mm, está garantizando la humedad necesaria para el pasto y un menor esfuerzo de las plantas para extraer el agua, a la vez se evita que la reserva de agua aprovechable (CC–PMP) se agote totalmente hasta llegar a PMP, causando problemas en el desarrollo o muerte de la planta.

4.1.5.5. Selección del aspersor

Características del aspersor (Anexo 9)
Mini cañón (Senninger 8025RD-2 1 ¼" RM)

Número de Boquilla:	# 26 x 14
Caudal del aspersor:	36, 80 gpm – 2, 32 l/s
Presión del aspersor:	35 PSI = 24 m.c.a
Altura del elevador:	1,75 m
Diámetro de húmedo:	45 m
Ángulo de inclinación:	25º

a) Número de posiciones del aspersor

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$N_p = \frac{S_r}{M_r} = \frac{S_r}{E_{lat} * E_{asp}}$$

$$N_p = \frac{3500\ m^2}{(30x30)\ m^2} = 3 \text{ posiciones de riego}$$

En la figura 16, presenta la superficie del área de regable de 0.35 ha, la cual se encuentra dividida en tres parcelas de riego A, B, C correspondientes al número de posiciones de riego, que realizó el aspersor. (Anexo 12),

Se definió una distribución en cuadrado (30 x 30) m al ser el más utilizado para este sistema semifijo y correspondiente al aspersor seleccionado; y a este marco se evaluó su distribución de uniformidad, que se detalló posteriormente.

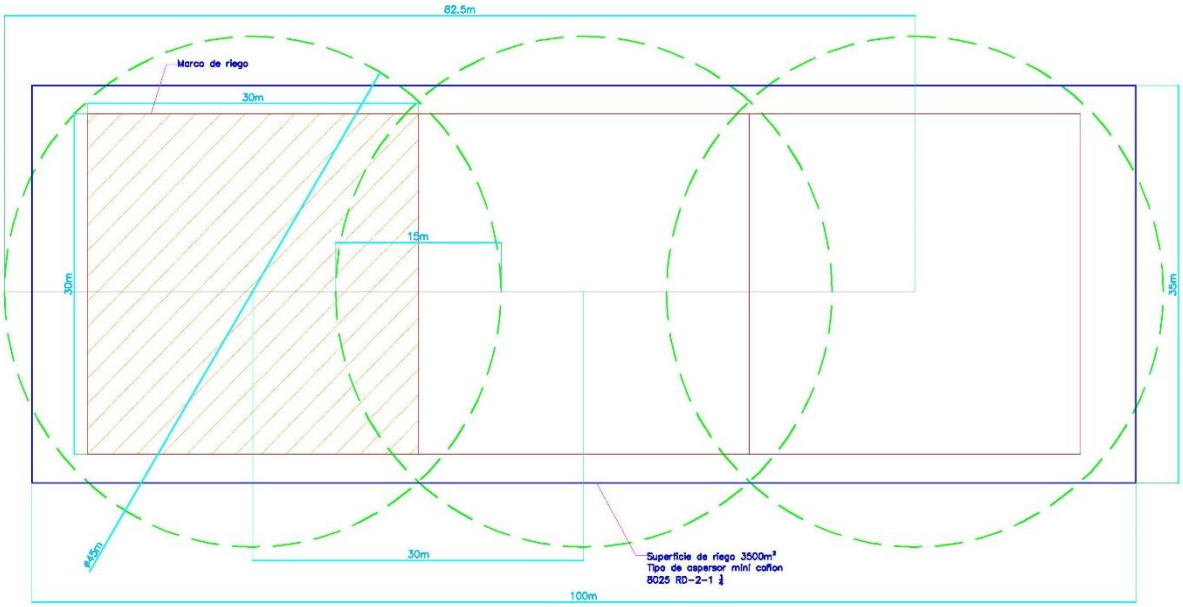


Figura 16. Representación del número de posiciones en la superficie de riego de 0,35 ha, con un marco de riego de (30 x 30) m.

b)

c) Intensidad de precipitación del aspersor

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$I_p = \frac{Q_d(LPS) * 3600}{M_r} = \frac{Q(LPS) * 3600}{E_{lat} * E_{asp}}$$

$$I_p = \left(\frac{2{,}32\ {}^{l}/_{s} * 3600}{30\ m * 30\ m}\right) = 9{,}28\frac{mm}{h}$$

Resultó la intensidad de precipitación del aspersor de 9,28 mm/h, es menor a la velocidad de infiltración del suelo de 19,68 mm/h, por ello cumple con la condición de $I_p \leq VIB$**,** cuya precipitación no causó encharcamiento de agua en el suelo.

d) Tiempo de riego por posición

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$T_r = \frac{L_r}{Ph_r}$$

$$T_r = \frac{4{,}90mm}{9{,}28\ mm/h} = 0{,}52\ h \approx 31\ minutos$$

El tiempo de riego por posición resultó de 31 min, al ser 3 posiciones de cambio del aspersor, se obtuvo un tiempo total de 93 min, el cual riega toda el área del proyecto.

4.1.6. Propuesta para el manejo y operación del sistema de riego por aspersión

Se definió el factor de operación del sistema de riego, para lo cual se consideró: la frecuencia de riego F_r de 2 días (corresponde al llenado del reservorio), C_r ciclo de riego 1 día y T_r tiempo de aplicación de riego por posición de 31 min, al ser 3 posiciones se obtuvo un total de 93 min (1,55 h), tal como se presenta en la figura 17.

Figura 17. Número de parcelas A, B, C corresponde a la posición por el aspersor; se aplica el tiempo de riego por posición de 31 min, una lámina de riego Lr de 4,9 mm.

A partir del **factor de operación**, se estableció la propuesta del manejo de agua de riego cuadro 8, pero antes de aquello, se realizó una modificación en el tiempo de riego por posición o parcela. El cual consistió en regar una sola parcela con el T_r tiempo total de aplicación de 93 min; y el llenado del reservorio se consideró como C_r ciclo de riego, tal como se presenta en la figura 18.

Figura 18. Parcelas A, B, C corresponde a la posición por el aspersor, se aplica el tiempo total de riego de 93 min por parcela y una lámina de 14,7 mm.

Cuadro 8. Propuestas de operación y manejo práctico del agua de riego

Frecuencia de riego (días)	Umbral de Riego UR (%)	Parcelas			Parcelas			Parcelas		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
		Cr	Cr	Cr	Tr min	Tr min	Tr min	L_r mm	L_r mm	L_r mm
6	7,16	**2**	**2**	**2**	93	93	93	14,7	14,7	14,7
12	**14,33**	**4**	**4**	**4**	**186**	**186**	**186**	**29,4**	**29,4**	**29,4**
18	21,50	6	6	6	279	279	279	44,1	44,1	44,1
24	28,67	8	8	8	372	372	372	58,8	58,8	58,8

$\boldsymbol{C_r} =$ Ciclo de riego. Es el tiempo dentro de la frecuencia de riego que se utilizó para regar, en este caso el $\boldsymbol{C_r}$ **es el llenado del reservorio en 2 días, tal como se presenta en la figura 18.**

$\boldsymbol{F_r} =$ Es el tiempo que transcurre los ciclos de riego hasta completar la frecuencia de riego, (días)

$\boldsymbol{T_r} =$ Tiempo de riego, (min)

$\boldsymbol{L_r} =$ Lámina de riego a la parcela, (mm)

Descripción de la propuesta que mayor se ajusta, para la operación y manejo del riego

Frecuencia de 12 días

En la figura 19, se describe la frecuencia de 12 días, el cual consistió de la siguiente forma:

Se llenó el reservorio correspondiente al $\boldsymbol{C_r}$ de 4 días del cual, se aplicó riego a la **Parcela A,** en un tiempo $\boldsymbol{T_r}$ de 186 min (es decir 93 min en la misma posición y 93 min más con el siguiente llenado); con una lámina de riego de 29,4 mm De igual manera se repite el ciclo de riego para la **Parcela B y C,** completando la frecuencia de 12 días; **con un umbral de riego UR = 14,33 %.**

Figura 19. Propuesta de riego para una frecuencia de 12 días, con un ciclo por parcela de 4 días.

De las propuestas presentadas, se recomienda **UR ≥ 14,33%** cuanto el pasto está ya establecido para el pastoreo. No se consideran **UR ≤ 14,33%** por estar con un alto contenido de humedad, el pisoteo animal podría alterar las condiciones físicas del suelo (ocasionan la pérdida de estructura, compactación, y por lo tanto afectan las relaciones suelo – agua), lo cual se corroboró, a lo afirmado por (Flavia, Carmen, & Analía, 2011).

,

4.1.7. Diseño hidráulico del sistema de riego

Se determinó en función del caudal, los diámetros de tubería, con sus respectivas pérdidas de carga en la tubería principal, secundaria. Para ello se calculó, mediante tramos como se presenta en la figura 21, el sistema de conducción de riego, en el cual detalla: la línea de conducción, pérdidas de carga y la energía disponible para el funcionamiento hidráulico del sistema. A continuación se presenta el cuadro 9, las pérdidas de carga en la tubería,

Cuadro 9. Pérdida de carga en la red de tubería, con el método de Hazen - Williams

Nº tramo	CAUDAL	LONGITUD	$\emptyset_e$ [1]	$\emptyset_i$ [2]	COTA INICIAL m.s.n.m	COTA TRAMO m.s.n.m	Diferencia de Altura (m) ΔH	V (m/s)	Distancia Inclinada Tubería (m)	J (m/100)	hf =J*L (m) real	Si cumple $\Delta H \leq hf$
		(m)										
	l/s	L	(mm)	(mm)								
1	0,10	123	20	17	2114	2107	7	0,44	123,20	1,62	1,99	OK
2	2,32	3	50	47	**2107**	2105	2	1,34	3,61	3,86	**0,14**	OK
3	2,32	140	50	47	2105	2075	30	1,34	143,18	3,86	5,53	OK
4	2,32	85	50	**47**	**2075**	**2065**	10	1,34	85,59	3,86	**3,31**	OK
	Total Longitud	350			**32 m***	**42 m****				**hf**	**8,98 m**	OK

[1] Diámetro exterior; [2] Diámetro interno, * diferencia de nivel al inicio de riego, ** diferencia de nivel al final del riego.

- ✓ **Pérdida de carga total en el Sistema de riego**

En el cuadro 10, presenta las pérdidas de carga, generadas en el sistema de riego; pérdidas por fricción de tubería y pérdidas locales (accesorios de riego).

Cuadro 10. Pérdidas de carga total del sistema

hf pérdida de carga	
Aspersor	24,00 m
Elevador	1,75 m
Lateral	1,78 m
Accesorios	1,37 m
Tuberías	9,0 m
Total	**38,00 m**

Finalmente, resulto la carga total del sistema de 38 m, siendo menor a la energía total disponible HT de 42 m, por lo tanto el sistema hidráulico funciona correctamente. En el Anexo 11 se detalla el cálculo hidráulico del Sistema de riego.

- ✓ **Condición de diseño**

Corresponde a un lateral descendente para la condición de: $H_g > h$. Se determinó la presión en el origen o mínima y al final del lateral o máxima presión, mediante las siguientes fórmulas:

Presión el origen o mínima

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{P_o}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} + \left(\frac{3}{4}\right) h - \frac{H_g}{2} + H_a$$

$$\frac{P_o}{\gamma} = 24\ m + \left(\frac{3}{4}\right) 1{,}78\ m - \frac{10\ m}{2} + 1{,}75\ m$$

$$\frac{P_o}{\gamma} = 22{,}09\ m$$

Presión máxima o en el último aspersor

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{P_u}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - \left(\frac{1}{4}\right) h + \frac{H_g}{2}$$

$$\frac{P_u}{\gamma} = 24\ m - \left(\frac{1}{4}\right) 1{,}78\ m + \frac{10}{2}$$

$$\frac{P_u}{\gamma} = 28{,}56\ m$$

Ecuación de diseño

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$h_f \leq 0{,}2 \frac{P_a}{\gamma}$$

$$1{,}75\ m \leq 0{,}2(24, m)$$

$$1{,}75\ \ m \leq 4{,}80\ m$$

Lo que indica que la pérdida en el lateral de 1,75 m, es menor que el rango permisible de 4,8 m por lo tanto cumple con la condición de diseño, y cabe señalar que el agua de riego se aplicó con un solo aspersor por posición, y se obtuvo los siguientes valores de presión tal como se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 11. Presiones de funcionamiento del aspersor por posición de riego

Posición de riego	Lecturas de la presión de trabajo (bar)	Caudal del aspersor (l/s)
1	25	2,34
2	26	2,38
3	28	2,48

Para explicar lo anterior se graficó la curva del aspersor que se presentó en la figura 20; y del análisis de la curva resultó la ecuación del aspersor $Q = 0,4755\ H^{0,5}$, de la cual se utilizó para la determinación del caudal de riego por posición, para ello se reemplazó el valor de (H), por las presiones de trabajo del aspersor que deben ser expresado en m.c.a.

En la figura 20, se indica las presiones generadas en el lateral y el caudal descargado. Por ello se concluyó que, para tener un mejor reparto de agua en la lateral descendente se pueden tomar las alternativas siguientes: colocar reguladores de presión, realizar el lateral con la combinación de dos diámetros de tubería diferente, o cambiar el trazado de lateral.

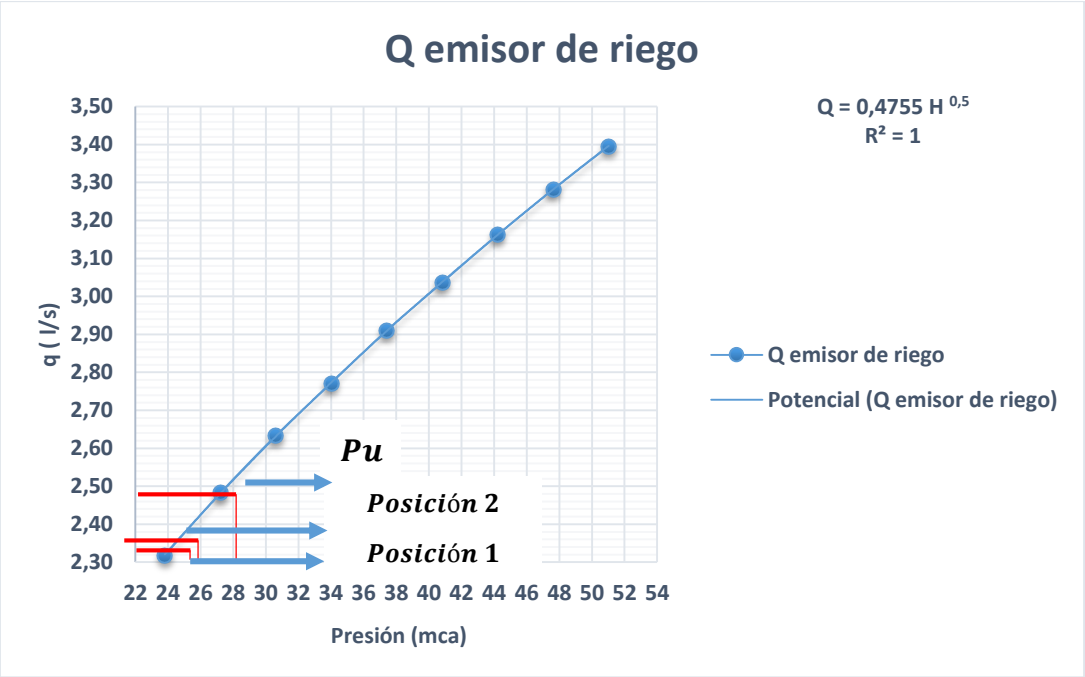


Figura 20. Curva del emisor de riego, caudal (l/s) vs la presión (m.c.a) para el aspersor Senninger modelo 8025

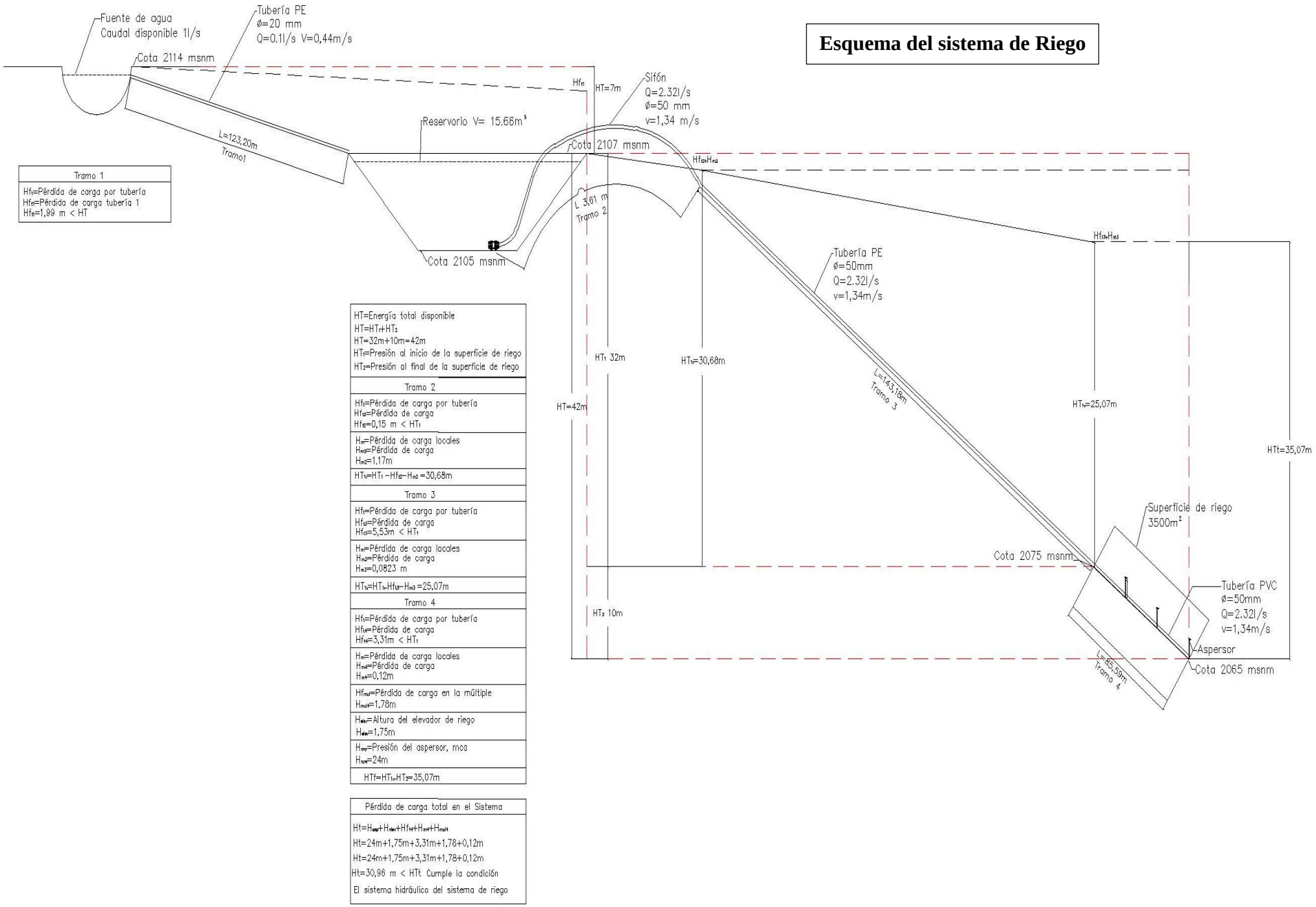


Figura 21. Esquema del sistema de riego, en el anexo 10 y 12 se detalla el mapa topográfico y el plano de diseño de riego.

4.2. Resultado para el segundo objetivo

"Instalar un sistema de riego por aspersión para el cultivo de pasto en la finca Landapo".

4.2.1. Tubería de conducción

- ✓ En el área de estudio, la fuente de agua disponible para riego, se encontró una pequeña obra de captación, realizada con mampostería de piedra y recubierto de cemento; con las siguientes dimensiones: 1.05 m de ancho parte frontal, sus lados 0.85 m y a una altura de 0.50 m.

- ✓ De la misma, se dispone de un caudal permanente de 0.1 l/s, en el cual se instaló, una tubería de polietileno PE 20 mm en el tramo de 123 m, hacia el depósito de almacenamiento (Anexo 1 y 2).

4.2.2. Reservorio

- ✓ Se construyó un reservorio, con las siguientes dimensiones: (base mayor 4,4 m, base menor 3,0 m y una altura de 1,20 m).

- ✓ El volumen total del reservorio es de 16,62 m^3, y se impermeabilizó las paredes del mismo, donde se tuvo una superficie de recubrimiento igual a 50 m^2; se recubrió con geomembrana de polietileno de alta densidad PEAD de 500 micras. (Anexo 7 y 13).

- ✓ Se colocó un flotador, en la parte superior, a la altura máxima del espejo de agua de 1,15 m, con ello se evitó el derrame de agua por excesos.

4.2.3. Instalación del sifón

Se cortó un tramo de 2 m de tubería de PE de 50 mm, se hizo un radio de curvatura, para ser ubicada al fondo del reservorio. En los extremos de la tubería de PE se realizó lo siguiente:

En el primer extremo se instaló la válvula Check PVC de 50 mm con canastilla; este accesorio evitó el retorno del agua al reservorio, cuando se hace el cebado del sifón.

En el segundo extremo se instaló una Tee PVC de 50 mm; esta permitió acoplar otro tramo de 0.50 m de PE en la parte superior; se incorporó una válvula de paso de PVC de 50 mm para realizar el cebado del sifón (llenado de agua con 5 litros).

Finalmente se acopló otro tramo de 0.60 m de tubería de PE, en la parte lateral de la Tee PVC de 50 mm, a esto se agregó una válvula de bola de PVC de 50 mm, que permitió el paso de agua a la tubería principal de riego.

Se fijó el sifón con sus respectivos accesorios, para lo cual el espejo de agua debe tener mayor altura con respecto a la válvula de salida, esta diferencia de nivel permitió extraer el agua, de un flujo de mayor altura a uno de menor altura, en este caso se extraer el caudal del aspersor de 2,32 l/s.

Los detalles de la instalación constan en el (Anexo 8, 9 y 13).

4.2.4. Tubería principal, secundaria y accesorios de riego

Tubería principal

- ✓ Tubería de polietileno PE de 50 mm; se transportó el caudal de diseño de 2,32 l/s, desde el reservorio hasta el inicio de riego.

Tubería secundaria (línea de riego)

- ✓ Se realizó la excavación de zanjas, a una profundidad de 0.25 m, con una distancia de 85 m; el volumen de desalojo es de 4.25 m^3 (85 m x 0.2 m x 0.25 m); y el mismo material sirvió para el relleno de la zanja.

- ✓ Se colocó 14 tubos de policloruro de vinilo PVC de 6 m, de diámetro 50 mm; tipo de conexión E/C, el cual transportó el caudal de 2,32 l/s, a toda la línea de riego.

Elevador de riego

- ✓ Se acopló 3 Tee reductoras de 50 mm x 40 mm, a la línea de riego de tubería de PVC de diámetro 50 mm.

- ✓ Se instaló un Tubo de PVC de diámetro 40 mm; con una altura de 1,75 m (desde la base de la zanja), correspondiente al elevador de riego.

- ✓ En el elevador se colocó, los respectivos adaptadores hembra PVC de 40 mm X 1 ¼"; donde insertó el aspersor conexión rosca macho RM. Mientras que los dos elevadores restantes, son acoplados a un tapón macho PVC 40 mm, que se irán cambiando de posición, cuando les toque su turno de riego. Los detalles de la instalación constan en el (Anexo 8 y 9).

En el siguiente cuadro 11, se presentan las características técnicas de la tubería y accesorios de riego:

Cuadro 12. Especificaciones de la tubería de riego

Diámetro nominal (mm)	Diámetro interno (mm)	Espesor nominal (mm)	Tipo de Material	Presión de trabajo			Descripción de tubería
				MPa	PSI	Kgf/cm^2	
20 mm	17,0	1,5	PE**	0,4	58	4,0	Tubería de conducción
50 mm	47,0	1,5	PVC*	0,8	116	8,0	Tubería principal
50 mm	47,0	1,5	PE**	0,7	105	7,0	Tubería secundaria
40 mm	37, 0	1,5	PVC*	1,0	145	10,2	Elevador de riego

** Este tipo de tubería PE en rollos de 100 a 200 metros; mientras los de PVC * de 6 m de longitud

Fuente: Catálogo de tuberías Tigre 2010

4.3. Resultados para el tercer objetivo

“Evaluar la uniformidad de aplicación del agua por los emisores de riego”

Se determinó, si los coeficientes de uniformidad de riego Cu y UD, aplicados mediante riego, por parte del aspersor seleccionado, están dentro de los límites aceptados de operación, en el Anexo 14 se presenta los resultados de coeficientes de uniformidad.

4.3.1. Coeficiente de uniformidad CU

Resultó un coeficiente de uniformidad del 80%, el mismo que se clasificó como buena distribución del agua por el aspersor, lo que indica, Macias & Pin (2011), que el valor obtenido es considerado aceptable en la práctica de riego por aspersión y el limite permisible es igual o mayor al 70% (Zuñiga, 2004).

Se evaluó el marco de riego seleccionado (30 x 30) m el cual presentó una aceptable distribución del agua de riego, para trabajar con el aspersor Senninger 8025 de 1 ¼”, de media presión 2.4 atm, tal como se muestra en la figura 22 y en Anexo 14.

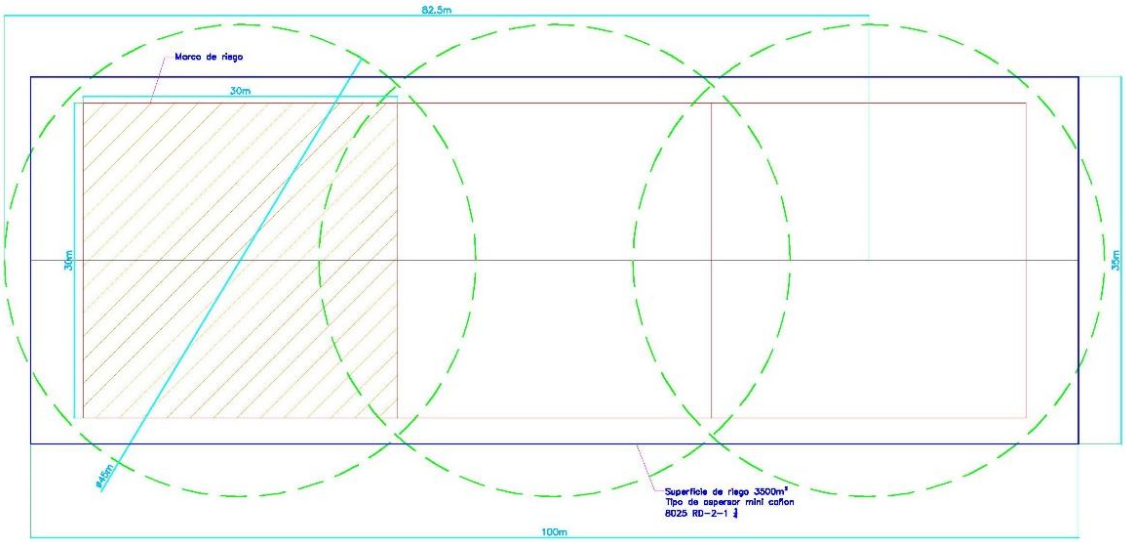


Figura 22. Marco de riego (30 x 30) m

Además se encontró el valor de la precipitación horaria de 8,46 mm/h a la distancia de 18 m desde el centro del aspersor, cuyo valor está dentro del promedio siendo aceptable para tomar en cuenta un nuevo marco de riego, por lo cual resultó de (35 x 30) m, tal como se presenta en la siguiente figura 23.

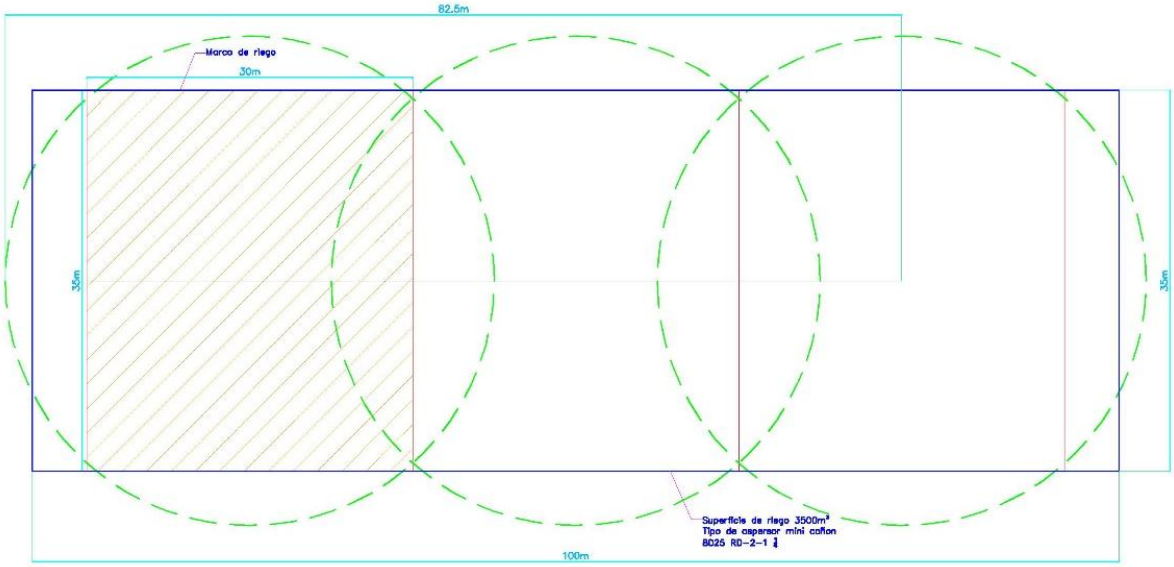


Figura 23. Marco de riego (35 x 30) m

4.3.2. Uniformidad de distribución UD

La uniformidad de distribución UD se obtuvo del 60%, se clasificó como mala distribución del agua de riego. A lo cual afirma, Morales (2002), el valor mínimo UD para riego agrícola debe ser del 67%.

El aspersor seleccionado, el área irrigada aumenta, pero la distribución de uniformidad de agua en el suelo disminuye a la distancia de 21 m, donde se encontró la precipitación horaria de 2,64 mm/h a 3,17 mm/h, siendo menor con respecto al promedio de 8,40 mm/h y por ello se presentó valores bajo de UD. (Anexo 14).

Lo que concuerda con la descripción de Zuñiga (2004), que UD bajos se debe, a la altura del agua aplicada por el aspersor va disminuyendo conforme aumenta la distancia, de ahí la importancia en considerar un marco de riego adecuado, el cual tiene como ventaja un riego más uniforme.

Datos generales

Se obtuvo la precipitación horaria promedio igual a 8,40 mm/h, este valor es menor a la precipitación horaria del aspersor calculada de 9,28 mm/h, por lo tanto al realizar el turno de riego se debe considerar la precipitación horaria evaluada.

La presión en el aspersor por posición de riego, presentó la siguiente variación: de 2,5 a 2,8 atm y un diámetro húmedo de 42 a 43 m. En el (Anexo 14), se presenta la distribución de los pluviómetros en el área de riego por el aspersor; el marco de riego (30 x 30) m.

V. CONCLUSIONES

- ✓ La demanda máxima del cultivo Et_c de 1,84 mm/día, y se aplicó una eficiencia de riego por aspersión del 75%.

- ✓ Las clases texturales corresponde a suelos: franco F_o, franco arenoso $F_o\ A_o$, franco arcilloso $F_o\ A_c$, y franco arcillo arenoso $F_oA_cA_o$.

- ✓ Las propiedades hidrofísicas del suelo son: AA 34%, CC 56,72 2%, PMP 26,19%, CA 5,96 %, porosidad del suelo 62%, y densidad aparente de 0,90 g/cm^3,

- ✓ La evaluación de la condición física del suelo, se clasificó en la categoría pobre (Zona II),

- ✓ La velocidad de infiltración básica $VIb\ de\ 19{,}85\ mm/h$ es mayor a la intensidad de precipitación del aspersor $I_p\ de$ 9,28 mm/h, por lo tanto cumple con la condición $I_p \leq VIb$.

- ✓ La frecuencia F_r de 12 días, ciclo de riego C_r de 4 días, tiempo de aplicación de riego T_r de 186 min, lámina de riego L_r de 29,4 mm y UR umbral de riego del 14,33 %, la cual cumple la condición para pastoreo.

- ✓ El volumen del reservorio impermeabilizado con geomembrana de 500 micras, y de una capacidad de almacenamiento de 15,66 m^3.

- ✓ La pérdida de carga total en el sistema es de 38 m siendo menor a la energía total de 42 m, por lo tanto el sistema hidráulico funcionó correctamente.

- ✓ Se aprovechó el desnivel topográfico del terreno para obtener la presión de funcionamiento del sistema de riego y la selección del aspersor, de media presión, de acuerdo a la energía disponible.

- ✓ La evaluación del sistema de riego determinó, que el CU es del 80%, por lo que se consideró como buena distribución, y UD del 60%, mala distribución del agua de riego.

VI. RECOMENDACIONES

- ✓ Implementar un tanque evaporímetro clase A, para la generación de datos de evaporación, a fin de ajustar con datos reales que se produce en el cultivo, como paso previo para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ETo.

- ✓ Buscar alternativas de recubrimiento para impermeabilizar las paredes y fondo del reservorio para lograr un menor costo y accesibilidad.

- ✓ Evaluar los parámetros hidráulicos del aspersor “Senninger modelo 8025”.

- ✓ Realizar estudios de comportamiento de acuíferos para la determinación de disponibilidad de agua.

- ✓ Incidencia del pastoreo bovino en las características físicas del suelo relacionadas con el riego.

- ✓ Estudio de la frecuencia de riego y su incidencia en el rendimiento de los pastos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Anten, M., & Willet, H. (2000). *Diseño de pequeños Sistemas de riego por apersión en ladera.* Cajamarca -Perú.
2. Aquiles, S. I. (2010). Riego suplementario en cultivos extensivos, panorama de Argentina y experiencia en la región central del país. *Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas*.
3. Cadena, N. V. (2012). *Hablemos de riego* (Vol. 1). Ibarra, Ecuador: Creadores Gráficos.
4. Calvache, U. M. (2010). *Manual del agua de Riego en Zonas de Laderas.* Qutio: Primera Edición.
5. Cardona, M. J. (2012). *Módulo Pastos y Forrajes Arauca.* Bogota: Federación Colombiana de Ganaderos.
6. Chávez, O. (1978). *Métodos de Riego Cursillo de divulgación.* Tegucigalpa - Honduras: Instituro Interamericano de ciencias Agricolas IICA OEA.
7. Chuvieco, E. (1990). *Fundamento de teledetección espacial.* Madrid: Rialp.
8. Cisneros, A. R. (2003). *Apuntes de la materia de Riego y Drenaje.* Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
9. FAO 56, O. d. (2006). *Evapotranspiración del cultivo.* Roma: Estudio Riego y Drenaje Nº 56.
10. Flavia, C., Carmen, C., & Analía, B. (2011). Propiedades Hidrofísicas de un Hapludol típico de Córdova en relación al pisoteo animal. *Asociación Argentina Ciencia del Suelo*.
11. Formoso, D., & Norbis, H. (n.d.). El riego de pasturas en la producción animal. *Programa Nacional de Pasturas y Forrajes*.
12. GAD PALTAS. (2014 - 2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Paltas.* Paltas.
13. Gaete, L. V. (2001). *Manual de Diseño de Sistema de Riego Tecnificado.*
14. Gómez, G. C. (2014). Evaluación de la Tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Schullcas.
15. Grassi J, C. (1998). *Fundamentos del riego.* Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigaciones Ambiental y Territorial.
16. Guerrero, A. M. (2012). *Diseño de un sistema de riego por aspersión con automatización para el sector de Ugñag, Cantón Penipe.* Riobamba, Ecuador: Tesis.

17. Iniguez, M. (2005). *Fertilidad, Fertilizantes y Fertilización del Suelo.* Loja.

18. Iñiguez, M. (1999). *Manejo y Conservación de Suelos y Aguas.* Loja, Ecuador.

19. Leitón, S. J. (1985). *Riego y drenaje.* Costa Rica: Universidad Estatal a distancia San José.

20. López, A. J. (2007). *Irrigación y Drenaje.*

21. Macías, M. J., Vergara, M. M., Macías, V., & Miguel, A. (2011). *Adaptación e instalación de un sistema de riego por aspersión, para cultivos comerciales establecidos en la comunidad.* (I. Agrícola, Ed.) Portoviejo, Manabí, Ecuador: Tesis.

22. Macias, M. M., & Pin, V. J. (2011). *"Evaluación de un sistema de riego por aspersión en el Cultivo de pastos Brachiaria Brizantha Marandu".* Portoviejo: Tesis.

23. Maldonado, R. T. (2001). *Climatología Agrícola.* Loja - Ecuador.

24. Maldonado, R. T. (2012). *Texto Guía de Riego por Gravedad o Superficie.* Loja: Primera Edición.

25. Montero, M. J. (2000). *Analisis de la Distribución de agua en Sistemas de Riego por Aspersión Estacionario.* España: Universidad de Castilla La Mancha.

26. Morales, M. C. (2002). *Determinación de parámetros de aplicación del agia por el equipo de riego a presión.* Guatemala, Guatemala: Tesis.

27. Negro, V. (1988). *Cátedra de Hidrología Agricola.* Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agratias.

28. Orjuela, M. H., Rubiano, R. S., & Camacho, T. J. (2010). Comportamiento de la Infiltación en un Oxisol. 31-39.

29. Ortiz, R. (2008). *Hídroponía en el suelo.* Quito: Ed. Ebya - Yala.

30. Pulamarin, C. L., & Necpas, N. L. (2011). *Estudio de la Factibilidad técnica, económica, social y ambiental de los sistemas de riego por aspersión comunitarios, en la microcuenca del río la Chimba, en el contorno territorial de la Organización COINOA.* Cayambe, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

31. Ramos, R. M., & Báez, R. D. (2013). *Diseño y construcción de un sistema de riego por aspersión en una parcela demostrativa en el Cantón Cevallos.* Riobamba, Ecuador: Tesis.

32. Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías.* Bogotá: Alfaomega .

33. Tarjuelo, J. M. (1991). *El riego por aspersión: Diseño y funcionamiento.* Albacete: Universidad de Castilla La Mancha.

34. Tarjuelo, J. M., & Benito, M. (2005). *El Riego por Aspersión y su Tecnología.* Madrid: Mundi - Prensa.

35. Valarezo, M. C., Iñiguez, I. M., Valarezo, M. L., & Guaya, P. P. (1998). *Condiciones Físicas de los Suelos de La región Sur del Ecuador.* Loja: Universidad Nacional de Loja.

36. Valarezo, M. L. (2013). *SIstemas de riego por presión.* Loja, Ecuador.

37. Valverde, C. J. (2007). *Riego y Drenaje.* San José, Costa Rica: Universidad Estatal a distancia.

38. Vega, S. I. (2010). *Riego por Aspersión.*

39. Vinhas, V. T., Rodrigues, C. A., Mistura, C., Duarte, C. M., & Cunha dos Santos, B. R. (2011). *Pastos e manejo.* Brasil.

40. Vivar, M. L. (1995). *Manual Técnico de Riego.* Loja: Gradimar.

41. Zuñiga, M. É. (2004). *Diseño y evaluación del riego a presión.* San José: Universidad de Costa Rica.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Medición del caudal

Figura 24. Aplicación del método volumétrico

Anexo 2. Medición de la Superficie de Riego

Figura 25. Levantamiento planímetro con el equipo GPS GARMIN OREGON 530

Anexo 3. Recolección de muestras de suelo disturbadas y no disturbadas

Figura 26. Toma de muestras a la profundidad de 20 cm para sus respectivos análisis físico – químico del suelo

Anexo 4. Resultados análisis físico – químicos del suelo realizados en el "Laboratorio de suelo y aguas del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables".

LABORATORIO DE ANALISIS FISICO-QUIMICO DE SUELOS, AGUAS Y BROMATOLOGIA
AREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

LASAB

Provincia:	Loja	**FECHA DE INGRESO:**	28/05/2015
Cantón:	Paltas	**FECHA DE EGRESO:**	10/06/2015
Parroquia:	Lauro Guerrero	**REMITENTE:**	Cristhian Gallegos
Sector:	Cola		

1. RESULTADOS DE ANÁLISIS

Cód. Lab.	Cód. Campo	Análisis Mecánico % TFSA			Textura	pH	M.O
		Ao	Lo	Ac			%
1661	M1	56,8	24	19,2	FoAo	4.76	8,20
1662	M2	44,8	28	27,2	FoAc	4.28	7,34
1663	M3	54,8	25	20,2	FoAcAo	4.43	6,48
1664	M4	36,8	24	39,2	FoAc	4.42	9,57
1665	M5	44,8	31	24,2	Fo	4.35	7,57

2. INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS

Cód. Lab.	Cód. Campo	Textura	pH	M.O
				%
1661	M1	Franco Arenoso	Muy Ácido	Alto
1662	M2	Franco Arcilloso	Muy Ácido	Alto
1663	M3	Franco Arcillo Arenoso	Muy Ácido	Alto
1664	M4	Franco Arcilloso	Muy Ácido	Alto
1665	M5	Franco	Muy Ácido	Alto

Ing. Omar Ojeda Ochoa Mg. Sc
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

Anexo 5. Resultados de las constantes hidrofísicas del suelo realizados en el "Laboratorio de suelo y aguas del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables".

LABORATORIO DE ANALISIS FISICO-QUIMICO DE SUELOS, AGUAS Y BROMATOLOGIA
AREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

LASAB

1. RESULTADOS DE CONSTANTES HIDROFÍSICAS

Código de Laboratorio	Código de Campo	Saturación	Capacidad de Campo 1/10 atm.	Capacidad de Campo 1/3 atm.	Punto de Marchitez Permanente 15 atm.	Densidad Aparente (g/cm³)	Agua Aprovechable
		(% peso)					
603	M1	68.41	61.61	59.32	28.66	0.90	32.95
604	M2	74.15	67.68	64.76	28.07	0.86	39.61
605	M3	59.58	55.99	53.97	28.49	1.02	27.50
606	M4	68.77	62.36	59.31	28.64	0.90	33.71

2. Resultados de constantes hidrofísicas contenido de humedad base peso.

Código de Laboratorio	Código de Campo	Textura	Saturación	Capacidad de Campo 1/10 atm,	Capacidad de Campo 1/3 atm,	Punto de Marchitez Permanente 15 atm,
			(% peso)			
603	M1	**Fo Ao**	68.41	**61,61**	59,32	**28,66**
604	M2	**Fo Ac**	74,15	**67,68**	64,76	**28,07**
605	M3	**Fo Ac Ao**	59,58	**55,99**	53,97	**28,49**
606	M4	**Fo**	68,77	**62,36**	59,31	**28,64**
		Promedio	67,73	**61,91**	59,34	**28,47**

3. Relación de las tensiones de humedad del suelo para graficar la curva de retención de humedad en base a volumen.

Código de Campo	Textura	Saturación	CC 1/10 atm	CC 1/3 atm	PMP 15 atm
		pF 0	pF 2	pF 2,52	pF 4,2
M1	**Fo Ao**	61,57	**55,45**	53,39	25,79
M2	**Fo Ac**	63,77	**58,20**	55,69	24,14
M3	**Fo Ac Ao**	60,77	**57,11**	55,05	29,06
M4	**Fo**	61,89	**56,12**	53,38	25,78
	Promedio	**62,0**	**56,72**	**54,38**	**26,19**

4. Evaluación de las condiciones hidrofísicas del suelo de la Finca Landapo con un pF 2 a capacidad de campo y los contenidos de humedad % base volumen.

Textura	Saturación	CC 1/10 atm	CC 1/3 atm	PMP 15 atm	Volumen total de sólidos VTS	Volumen total de poros VTP	Capacidad de aireación CA	Agua aprovechable AA	Volumen Físicamente Inerte VFI
	pF 0	pF 2	pF 2,52	pF 4,2	%				
Fo Ao	61,57	55,45	53,39	25,79	38,43	61,57	6,12	29,66	64,22
Fo Ac	63,77	58,2	55,69	24,14	36,23	63,77	5,57	34,06	60,37
Fo Ac Ao	60,77	57,11	55,05	29,06	39,23	60,77	3,66	28,05	68,29
Fo	61,89	56,12	53,38	25,78	38,11	61,89	5,77	30,34	63,89
Promedio	**62,00**	**56,72**	**54,38**	**26,19**	**38,00**	**62,00**	**5,28**	**30,53**	**64,19**

a) Volumen total de sólidos

$VTS = 100 - Sat$

$Saturación = Porosidad$

$Saturación = macroporos + microporos$

$VTS = volumen\ total\ de\ los\ sólidos$

$VTS = 100 - VTP$

$VTS = 100 - 62\%\ Volumen\ ocupado\ por\ lo\ el\ agua\ y\ aire$

VTS = 38 % Volumen ocupado por las partículas del suelo

b) Volumen total de poros (saturación = porosidad)

$VTP = pF\ O\ equivale\ a\ la\ Saturación$

$VTP = Volumen\ total\ de\ poros$

$VTP = pF\ O\ equivale\ a\ la\ Saturación$

$VTP = 62\ \%$

c) Agua aprovechable

$AA = CC - PMP$

$AA = Agua\ aprovechable$

$CC = Punto\ de\ marchitez\ permanente$

$AA = 56{,}72\% - 26{,}19\% = 30{,}53\%$

d) Capacidad de aireación

$CA = Sat - CC$

$CA = Capacidad\ de\ aireación$

$Sat = Saturación$

$CC = Capacidad\ de\ campo$

$CA = 62\% - 56{,}72\% = 5{,}28\%$

e) Volumen físicamente inerte

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

$VFI = Volumen\ físicamente\ inerte$

$100 = constante$

$VTP = Volumen\ total\ de\ poros$

$PMP = Punto\ de\ marchitez\ permanente$

$VFI = [100 - (62\% - 26{,}19\%)] = 64{,}19\%$

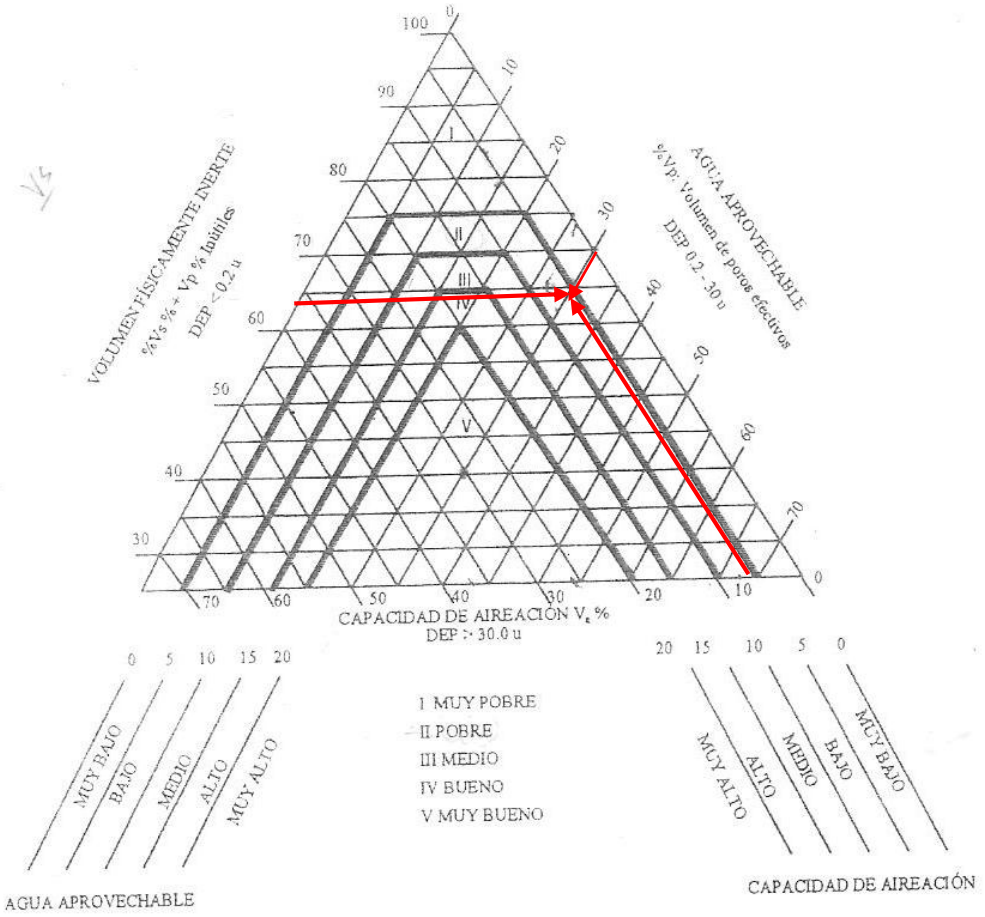


Figura 27. Diagrama triangular para la evaluación de las condiciones físicas del suelo.

Considerando la figura 27, con los valores obtenidos de VFI**,** AA y CA**,** se clasificó dentro de la Zona II, que se considera como pobre, la cual presenta dificultad en el crecimiento de la planta.

Anexo 6. Datos de prueba de campo de la infiltración del agua en el suelo

Tiempo parcial	Tiempo acum	lamina leída	lamina parcial	lamina acum	lamina parcial	lamina acum	Vel. Infiltra	Vel. Infiltra
min	min	cm	cm	cm	mm	mm	mm/h **Inst**	mm/h **promd**
0		**22**						
1	1	21,5	0,5	0,5	5	5	300	300,0
1	2	21,3	0,2	0,7	2	7	120	210,0
1	3	21	0,3	1	3	10	180	200,0
1	4	20,6	0,4	1,4	4	14	240	210,0
1	5	20,5	0,1	1,5	1	15	60	180,0
1	6	20,3	0,2	1,7	2	17	120	170,0
1	7	20,2	0,1	1,8	1	18	60	154,3
5	12	20	0,2	2	2	20	24	100,0
5	17	19,5	0,5	2,5	5	25	60	88,2
5	22	19	0,5	3	5	30	60	81,8
5	27	18,5	0,5	3,5	5	35	60	77,8
5	32	18	0,5	4	5	40	60	75,0
5	37	17,5	0,5	4,5	5	45	60	73,0
10	47	17,2	0,3	4,8	3	48	18	61,3
10	57	16,5	0,7	5,5	7	55	42	57,9
10	67	15,5	1	6,5	10	65	60	58,2
10	77	14,5	1	7,5	10	75	60	58,4
10	87	14,00	0,5	8	5	80	30	55,2

Datos del cuadro:

- Se anotaron las láminas parciales infiltradas en (cm) y tiempo parcial en (min).
- La lámina parcial: indica la infiltración (en cm) entre dos lecturas; esta es la diferencia en los niveles de agua medidos entre dos lecturas.
- Tiempo de la prueba: 90 minutos correspondientes al tiempo total acumulado.

Las velocidades de infiltración se obtuvieron mediante las siguientes relaciones:

a) $$\boldsymbol{Velocidad\ infiltración\ promedio = \frac{Lámina\ acumulada\ (mm)}{tiempo\ acumulado(min)} * \frac{60\ min}{1\ h} = mm/h}$$

$$\boldsymbol{b)\ Velocidad\ infiltración\ instantanea\ = \frac{Lámina\ parcial\ (mm)}{tiempo\ parcial(min)} * \frac{60\ min}{1\ h} = mm/h}$$

Anexo 7. Diseño constructivo del Reservorio

Figura 28. . Detalles constructivos, colocación de la geomenbrana de 500 micras

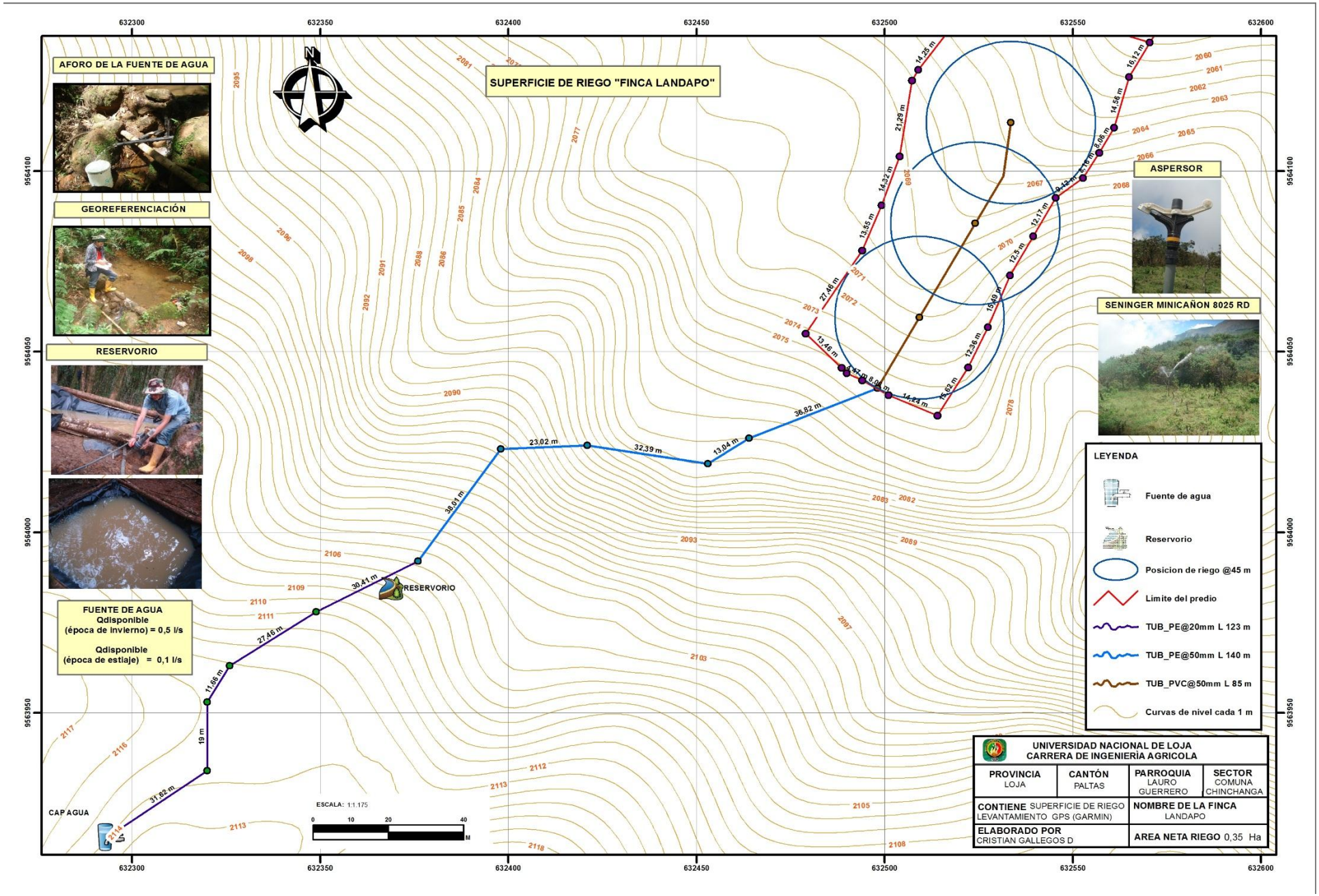
Anexo 8. Materiales y accesorios para la instalación del sistema de riego

Figura 29. Zanjas de 0.25 m; tuberías de PE y PVC; accesorios de riego

Anexo 9. Funcionamiento del Sistema de Riego y evaluación

Figura 30. Funcionamiento del aspersor mini cañón 8025 RD 1 1/4", presión en la boquilla de 35 PSI (24 m.c.a), boquilla # 26 x 14 y un caudal del aspersor de 2,32 l/s

Anexo 10. Mapa topográfico de la superficie de riego "Finca Landapo", Parroquia Lauro Guerrero, cantón Paltas provincia de Loja.


SUPERFICIE DE RIEGO "FINCA LANDAPO"
AFORO DE LA FUENTE DE AGUA
GEOREFERENCIACIÓN
RESERVORIO
ASPERSOR
SENINGER MINICAÑON 8025 RD
FUENTE DE AGUA
Qdisponible
(época de invierno) = 0,5 l/s
Qdisponible
(época de estiaje) = 0,1 l/s
CAP AGUA
RESERVORIO
ESCALA: 1:1.175
LEYENDA
Fuente de agua
Reservorio
Posicion de riego @45 m
Limite del predio
TUB_PE@20mm L 123 m
TUB_PE@50mm L 140 m
TUB_PVC@50mm L 85 m
Curvas de nivel cada 1 m
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRICOLA
PROVINCIA LOJA
CANTÓN PALTAS
PARROQUIA LAURO GUERRERO
SECTOR COMUNA CHINCHANGA
CONTIENE SUPERFICIE DE RIEGO LEVANTAMIENTO GPS (GARMIN)
NOMBRE DE LA FINCA LANDAPO
ELABORADO POR CRISTIAN GALLEGOS D
AREA NETA RIEGO 0,35 Ha

Anexo 11. Cálculo del sistema de riego por aspersión

1. Información básica para el diseño del sistema de riego por aspersión

1.1. Datos de la parcela

1.1.1. Área total: 4 ha

1.1.2. Área Neta riego: 0.3513 ha - 3513 m^2

1.1.3. Pendiente del terreno: 15 - 30 %

1.2. Cultivo

1.2.1. Tipo de cultivo:

Pastos Brachiaria decumbens, tolerante a suelos de baja fertilidad.

1.2.2. Practica agrícola: Método de Siembra al voleo 3 - 5kg/ha

1.2.3. Et máx mm/día: 1.84 mm/día

1.2.4. Caudal continuo q_c: 0.28 l/s/ha

1.2.5. Superficie de riego S_r: 0.3513 ha -3513 m^2

1.2.6. Profundidad de raíces : 500 mm

1.2.7. % de agua aprovechable base peso: 33.44%

1.3. Análisis de suelo Físico - químico

1.3.1. Textura: FoAo, FoAc, FoAcAo, Fo

1.3.2. pH: 4.45 muy ácido

1.3.3. MO: 7.8 % Alto contenido

1.3.4. Constantes hidrofísicas:

1.3.5. CC 1/10 atm en base a peso: 61.91 % - 0.62

1.3.6. CC 1/3 atm en base a peso: 59.34 % - 0.59

1.3.7. PMP 15 atm en base a peso: 28.47 % - 0.28

1.3.8. Da (g/cm3): 0.92 g/cm^3

1.3.9. Agua Aprovechable %: 33,44 %

1.3.10. VIB mm/hora: 19,64 mm/h

1.4. Método de Riego

1.4.1. Eficiencia de aplicación: 75% Riego por aspersión

1.4.2. Frecuencia de riego: Frecuencia cada 2 días se riega en un día durante 2 horas.

1.5. Abastecimiento de agua

1.5.1. Fuente de abastecimiento: acuífero libre

1.5.2. Caudal disponible verano: 0.1 l/s

1.5.3. Caudal disponible invierno: 0.5 l/s

1.5.4. Altitud: 2 114 m.s.n.m

2. Diseño hidráulico del sistema de riego

Se determinó la red hidráulica del Sistema de riego, dimensiones de la red principal, secundaria, pérdidas de carga en las tuberías y accesorios. Se empleó la fórmula Hazen – Williams aplicable para diferentes tipos de tubería, tal como se representó en el esquema de del sistema de riego en la figura.

Fuente de energía: suministrada por la gravedad es decir por la diferencia de elevación en el terreno.

Pr al inicio del sistema de riego: 32 m

Pr al final del sistema de riego: 42 m

Desarrolló de los tramos propuesto para su respectivo cálculo:

a) Características en el tramo 1

Se consideró lo siguientes datos:

Cota topográfica: 2114 msnm

Cota reservorio: 2107 msnm

$\Delta HT =$ 7 m

$q_d =$ 0,1 l/s correspondiente al caudal disponible

Ø = 20 mm

$V =$ 0.44m/s

$DH =$ 122 m

$DI_{Inclinada} =$ 123, 20 m

- **Pérdidas de carga por fricción Longitudinal (hf)**

Aplicando las siguientes ecuaciones resultó una pérdida de carga igual:

Ec. Blasius	Hf = 1.77 m < HT
Ec. Darcy – Weisbach	Hf= 2.63 m < HT
Ec. Hazen – William	Hf= 1.98 m < HT

b) Características en el tramo 2

Se consideró lo siguientes datos:

Extracción del caudal de diseño a través de un sifón

Cota Reservorio:	2107 msnm
Cota del terreno:	2105 msnm
ΔHT:	3 m
$Q_d =$	2.32 l/s caudal de diseño
Ø =	50 mm
$V =$	1, 34 m/s
$DH =$	3 m
$DI_{Inclinada} =$	3, 61 m

- **Pérdidas de carga por fricción Longitudinal**

Aplicando las siguientes ecuaciones resultó una pérdida de carga igual:

Ec. Blasius	Hf_2 = 0.36 m < HT
Ec. Darcy – Weisbach	Hf_2= 0.15 m < HT
Ec. Hazen – William	Hf_2= 0.14 m < HT

- **Pérdidas de carga locales H_{m_2}**

Se determinó con la siguiente fórmula:

$$Hm_2 = \sum km * \frac{V^2}{2g}$$

$$Hm_2 = 12{,}8 * \frac{(1{,}34)^2}{2g}$$

$$Hm_2 = 1{,}17m$$

Cuadro 13. Coeficientes de pérdida de carga en accesorio para el tramo 2

Perdida de Carga menores			
Accesorios	**km**	**Nro. Accesorios**	**km**
Válvula de globo, completamente abierta	10	1	10
Válvula Check	2.5	1	2.5
Tee en sentido recto	0.3	1	0,3
		$\sum km$	**12,8**

c) Características en el Tramo 3

Se consideró lo siguientes datos:

Cota salida del reservorio: 2105 msnm

Cota inicio de riego: 2075 msnm

ΔHT: 30 m

$Q_d =$ 2.32 l/s caudal de diseño

Ø = 50 mm

$V =$ 1.34 m/s

$DH =$ 140 m

$DI_{Inclinada} =$ 143,18 m

- **Pérdidas de carga por fricción longitudinal**

Aplicando las siguientes ecuaciones resultó una pérdida de carga igual:

Ec. Blasius	Hf_3= 5.63 m < HT
Ec. Darcy – Weisbach	Hf_3= 6.04 m < HT
Ec. Hazen – William	Hf_3= 5.53 m < HT

- **Pérdidas de carga locales H_{m_3}**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$H_{m_3} = \sum km * \frac{V^2}{2g}$$

$$H_{m_3} = 0{,}90 * \frac{(1{,}34)^2}{2g}$$

$$H_{m_3} = 0{,}08236\, m$$

Cuadro 14. Coeficientes de pérdida de carga en accesorio para el tramo 3

Perdida de Carga menores			
Accesorios	**km**	**Nro. Accesorios**	**km**
Unión	0.3	3	0,9
		$\sum km$	**0.9**

$$\sum HT = Hf + \sum hm$$

$$\sum HT = 5,53\, m + 0{,}0823\, m$$

$$\sum HT = 5.61\, m$$

HT (Cota desde la salida del reservorio 2105 msnm - Cota inicio de riego 2075 msnm)

$$\sum HT = \text{HT}\ (30\text{m}) - 5.61\, m$$

$$\sum HT = 24.39\, m$$

d) Características en el tramo 4

Se consideró lo siguientes datos:

Cota inicio de riego:	2075 msnm
Cota final de riego:	2065 msnm
ΔHT:	10 m
$Q_d =$	2.32 l/s caudal diseño
Ø =	50 mm
$V =$	1,34 m/s
$DH =$	85 m
$DI =$	85,59 m

- **Pérdidas de carga por fricción longitudinal**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

Ec. Blasius	Hf_4 = 3,82 m < Ht
Ec. Darcy – Weisbach	Hf_4= 3, 61 m < Ht
Ec. Hazen – William	Hf_4= 3, 31 m < Ht

- **Diseño del lateral**

Se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$hf_L = \text{hf} * F$$

$$hf_L = 3{,}31 \text{ m} * 0{,}5403$$

$$hf_L = 1{,}78 \text{ m}$$

Donde F se calculó de con la siguiente fórmula:

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

$$F = \frac{1}{1{,}8+1} + \frac{1}{2*3} + \frac{\sqrt{1{,}8-1}}{6*3^2}$$

$F = 0{,}5403$

- **Pérdidas de carga locales H_{m_4}**

Se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Hm_4 = km * \frac{V^2}{2g}$$

$$Hm_4 = 1{,}32 * \frac{(1{,}34\ m/s)^2}{2 * 9{,}81}$$

$$Hm_4 = 0{,}12\ m$$

Cuadro 15. Coeficientes de pérdida de carga en accesorio para el tramo 4

Perdida de Carga menores			
Accesorios	**km**	**Nro. Accesorios**	**km**
Codo de 45º	0,42	1	0,42
Tee en sentido recto	0,30	3	0,90
		$\sum Hm$	**1.32**

e) Pérdida de carga total en todo el Sistema

Se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\mathrm{H}_T = \sum_{Tramo=2}^{4} h_f + \sum_{Tramo=2}^{4} h_m + hf_L + \mathrm{H}_{asp} + \mathrm{H}_{elev}$$

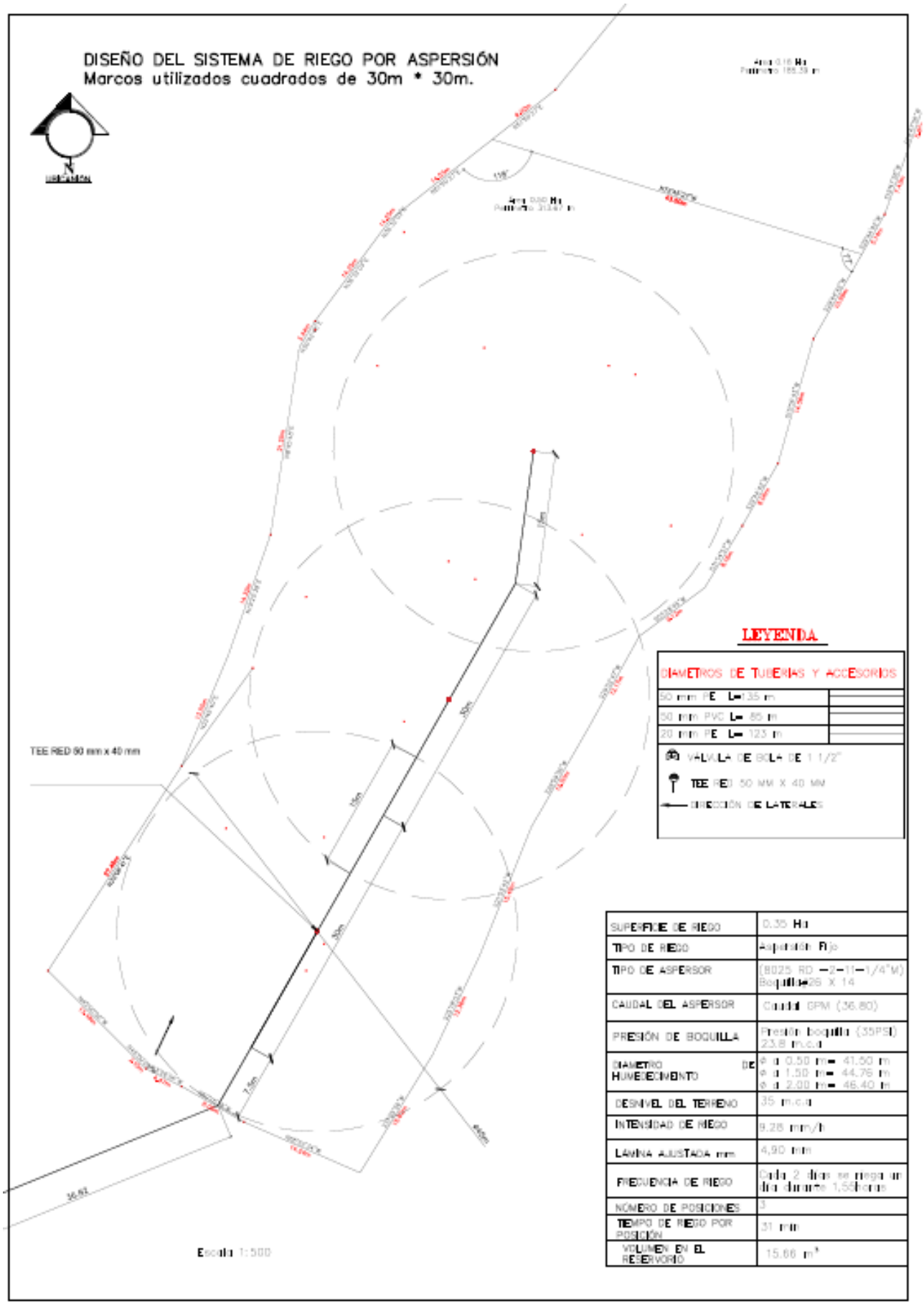
$\mathrm{H}_T = 9\ \mathrm{m} + 1{,}37\mathrm{m} + 1{,}78\ m + 24\ m + 1{,}75\ \mathrm{m}$

$\mathrm{H}_T = 38\ \mathrm{m} < \mathrm{HT}\ Energía\ total\ disponible\ en\ el\ sistema$

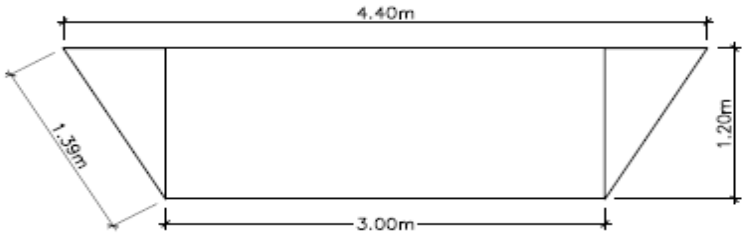
$\mathrm{H}_T = 38\ \mathrm{m} < 42\ Energía\ total\ disponible\ en\ el\ sistema$

Por lo tanto el sistema hiralico de riego funicona correctamente

Anexo 12. Plano del diseño de riego por aspersión

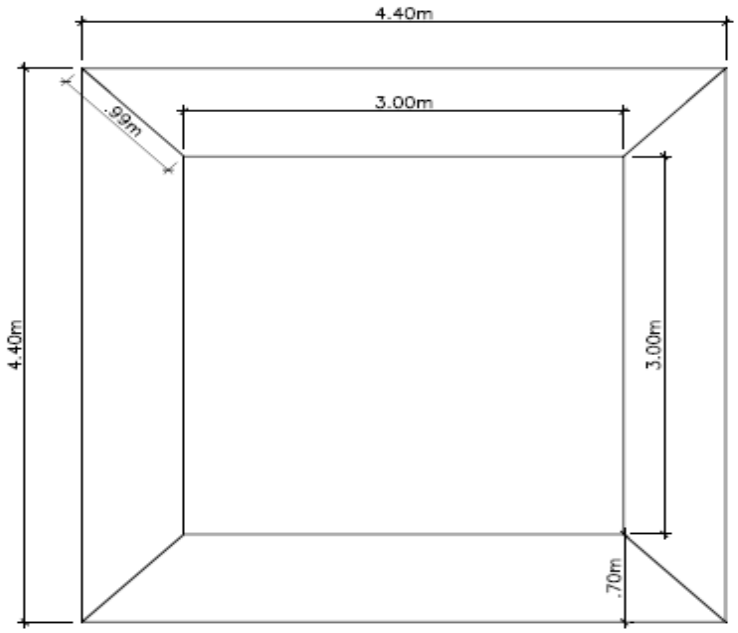

DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN
Marcos utilizados cuadrados de 30m * 30m.
TEE RED 50 mm x 40 mm
LEYENDA
DIAMETROS DE TUBERIAS Y ACCESORIOS
50 mm PE L=135 m
50 mm PVC L= 55 m
20 mm PE L= 123 m
VALVULA DE BOLA DE 1 1/2"
TEE RED 50 MM X 40 MM
DIRECCIÓN DE LATERALES
SUPERFICIE DE RIEGO
0.35 Ha
TIPO DE RIEGO
Aspersión Fijo
TIPO DE ASPERSOR
(8025 RD -2-11-1/4"M)
Boquilla=26 X 14
CAUDAL DEL ASPERSOR
Caudal GPM (36.80)
PRESIÓN DE BOQUILLA
Presión boquilla (35PSI)
23.8 m.c.a
DIAMETRO DE HUMEDECIMIENTO
ø a 0.50 m= 41.50 m
ø a 1.50 m= 44.76 m
ø a 2.00 m= 46.40 m
DESNIVEL DEL TERRENO
35 m.c.a
INTENSIDAD DE RIEGO
9.28 mm/h
LAMINA AJUSTADA mm
4,90 mm
FRECUENCIA DE RIEGO
Cada 2 días se riega un día durante 1,5 horas
NÚMERO DE POSICIONES
3
TIEMPO DE RIEGO POR POSICIÓN
31 min
VOLUMEN EN EL RESERVORIO
15.66 m³
Escala 1:500

Anexo 13. Plano diseño del reservorio de almacenamiento



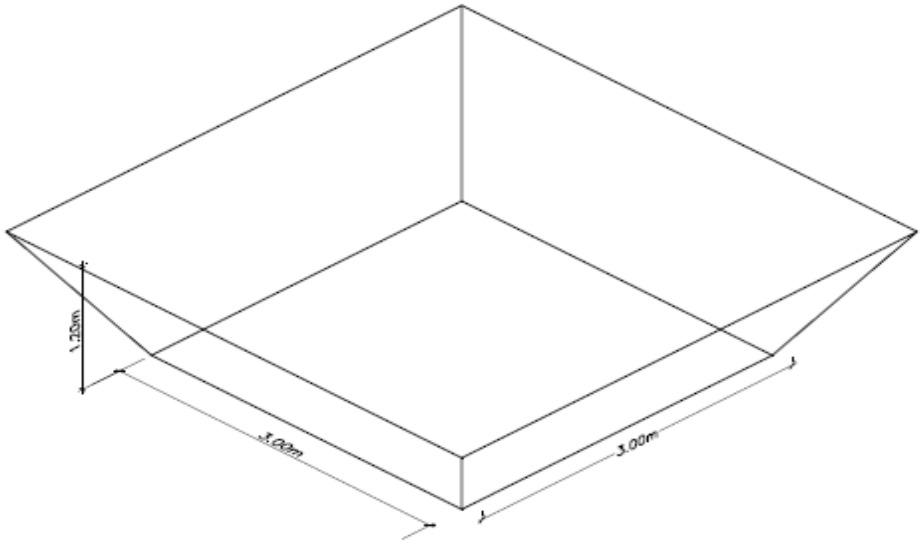
Vista Frontal

ESC. 1/50



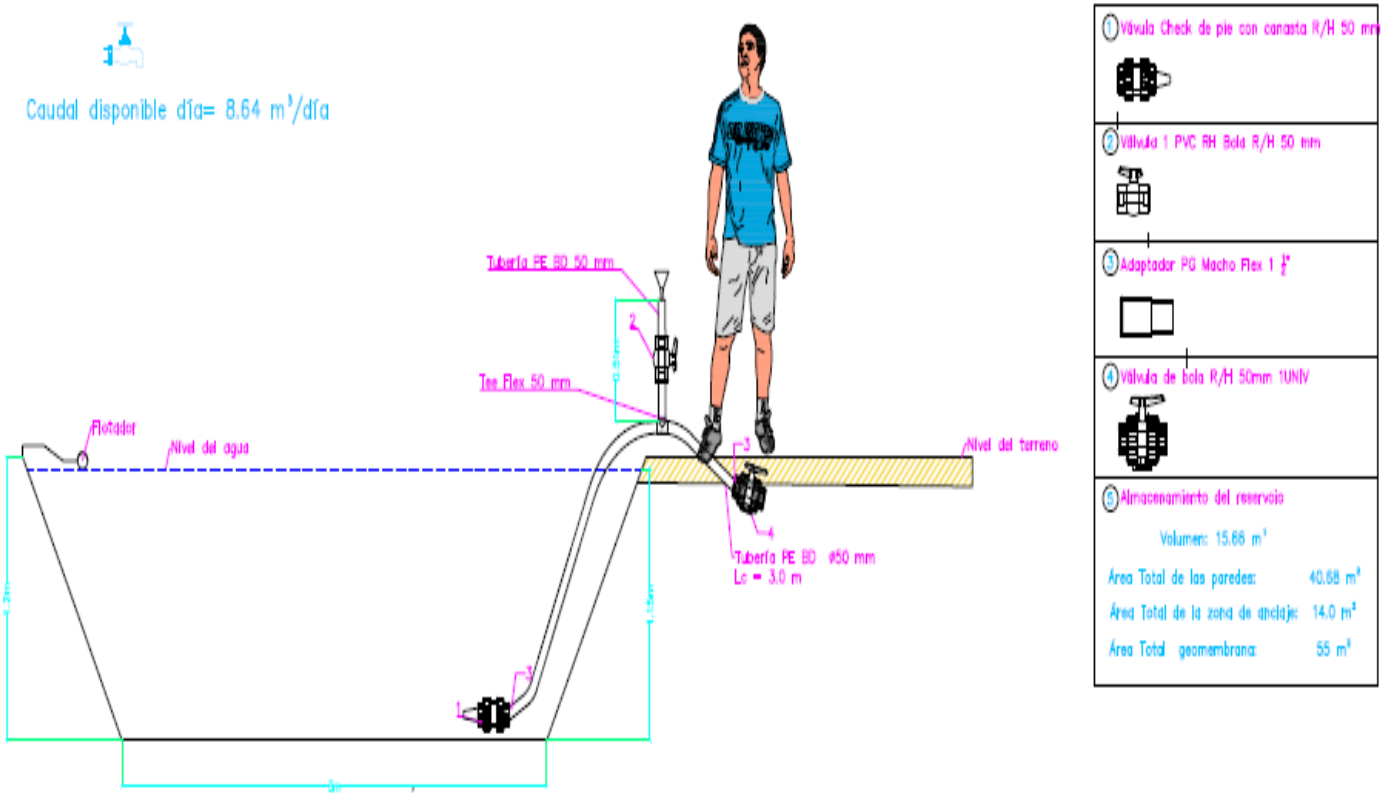
Vista en Planta

ESC. 1/50



Vista en Perspectiva

ESC. 1/50

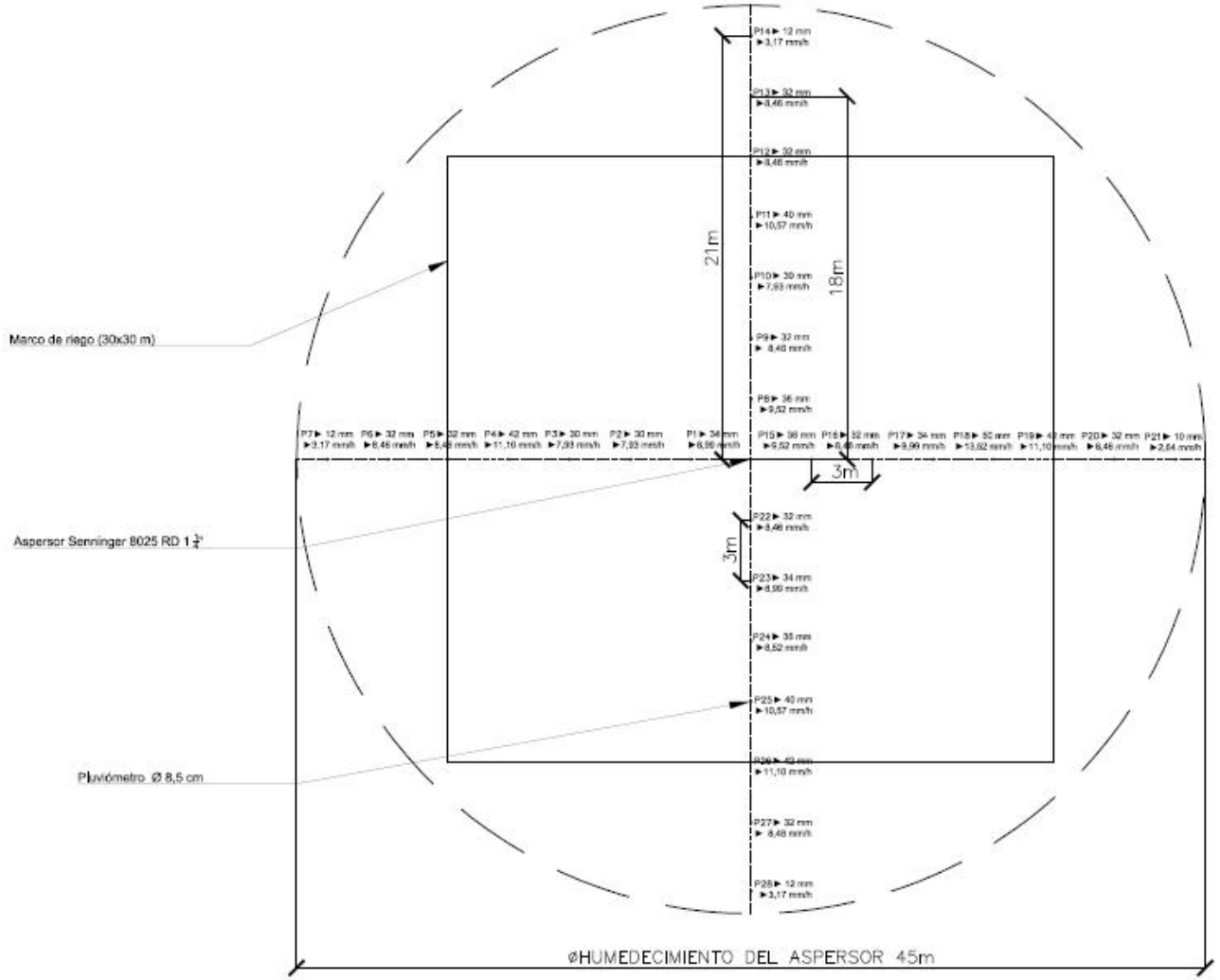


CORTE A - A'

ESC. 1/40

Anexo 14. Evaluación del sistema de riego por aspersión

EVALUACIÓN DEL CU DEL ASPERSOR



Escala 1:300

Materiales

Distancia entre pluviómetro

Funcionamiento aspersor

Características del aspersor

Modelo: Senninger
Mini cañón 8025RD2 1 3/4"
Caudal: 2,32 l/s
Presión: 2,4 atm
Diámetro humedec: 45m
Altura elevador: 1,50m

Cuadro 16. Datos de campo de la evaluación del emisor de riego, la duración del ensayo 40 min.

Nº	Volumen en cm^3 (L)	L-M	L - M (ABS)	PP (mm/h)
1	34	2,21	2,21	8,99
2	30	-1,79	1,79	7,93
3	30	-1,79	1,79	7,93
4	42	10,21	10,21	11,10
5	32	0,21	0,21	8,46
6	32	0,21	0,21	8,46
7	12	-19,79	19,79	**3,17**
8	36	4,21	4,21	9,52
9	32	0,21	0,21	8,46
10	30	-1,79	1,79	7,93
11	40	8,21	8,21	10,57
12	32	0,21	0,21	8,46
13	32	0,21	0,21	8,46
14	12	-19,79	19,79	3,17
15	36	4,21	4,21	9,52
16	32	0,21	0,21	8,46
17	34	2,21	2,21	8,99
18	50	18,21	18,21	13,22
19	42	10,21	10,21	11,10
20	32	0,21	0,21	8,46
21	10	-21,79	21,79	**2,64**
22	32	0,21	0,21	8,46
23	34	2,21	2,21	8,99
24	36	4,21	4,21	9,52
25	40	8,21	8,21	10,57
26	42	10,21	10,21	11,10
27	32	0,21	0,21	8,46
28	12	-19,79	19,79	3,17
∑	**890**	**∑**	**173,00**	235,26
m	**31,79**		**m**	**8,40**
n	**28**			
CU	**80,6 %**			
UD	**60 %**			

Interpretación de Los Resultados

$\mathbf{C_u}$ = Coeficiente de uniformidad

$\mathbf{U_d}$ = Uniformidad de distribución

$\mathbf{m}$ = Valor medio de las lecturas

$\boldsymbol{L}$ = Valor de cada una de las lecturas

$\sum(\boldsymbol{L}-\boldsymbol{m})$ = Suma de todas las lecturas

$\sum(\boldsymbol{L}-\boldsymbol{m})$ = Suma de todas las lecturas absolutas

$\boldsymbol{PP}$ = Precipitación horaria en mm/h

Anexo 15. Presupuesto de materiales y accesorios del Sistema de Riego

LISTADO DE MATERIALES RIEGO POR ASPERSIÓN			
DESCRIPCIÓN	**PRECIO UNITARIO**	**CANTIDAD**	**TOTAL**
TUBERÍA DE CONDUCCIÓN			
Tubería Flex BD 20 mm x 0,320MPA (46PSI) 32 m	$0,17	123	$20,91
Unión 1 FLEX 1/2"	$0,36	1	$0,36
TUBERÍA PRINCIPAL			
Tubería Flex BD 1 1/2" (105 PSI) 71 m	$0,99	140	$138,12
Unión FLEX 1 1/2"	$0,76	1	$0,76
TUBERÍA SECUNDARIA			$0,00
Tubo TI PVC EC 50 mm x 0,8 MPA (115 PSI) 80 m X 6 M	$7,30	14	$102,20
TEE TR ER 50 X 40 MM RED PVC PEGABLE	$1,88	3	$5,63
Tapón TI Hembra ER 50 mm PVC Hembra pegable	$0,71	1	$0,71
Adaptador Flex Macho PG 1 1/2"	$0,76	1	$0,76
Adaptador Hembra PVC pegable 50 mm x 1 1/2"	$0,76	1	$0,76
Codo de 45 x 50 mm PVC pegable	$3,50	1	$3,50
ASPERSOR - ELEVADOR			
SENNINGER 8025RD-2 -1 1/4" RM, Boq # 26X14, **Q (36,80 GPM) (diámetro a 0.50m, diámetro a 1 m)**	$108,90	1	$108,90
Adaptador TR ER 40 mm a 1 1/4 " PVC Hembra	$0,67	3	$2,01
Tub TI PVC EC 40 mm x 1 MPA x 6m	$5,27	1	$5,27
Tapón TI Macho PVC Roscable 1 1/4"	$0,76	3	$2,28
ACCESORIOS CONPLEMENTARIOS			$0,00
Pega TG 705 PVC 118 ml	$2,54	1	$2,54
Manómetro de Glicerina RM 1/4" @ 10 Bar	$11,83	1	$11,83
Bushing EM 1 1/4 X 1" PP	$0,93	1	$0,93
Buje TI PP roscable 1 X 1/2 "	$0,53	1	$0,53
RESERVORIO Y COMPLEMENTOS DEL SIFÓN			$0,00
Flotador Rotoplas para Tanque	$14,42	1	$14,42
Válvula retención Check (horizontal) PP 50 mm EC	$11,16	1	$11,16
Adaptador PG Macho Flex1 1/2"	$0,84	6	$5,06
TEE TR PL FELX 1 1/2"	$0,76	1	$0,76
Válvula de bola RR Universal 50 mm	$13,04	2	$26,07
Geomenbrana (500 micras) x 7 m	$3,50	56	$196,00
COMPLEMENTOS			
Estudio de suelos global			$74
Jornales de trabajo (8 horas)	$15,00	10	$ 150, 00
Protección del reservorio (cercado con alambre de púas)	$0,16	100 m	$16
TOTAL			**$ 901,47**

Anexo 16. Estaciones meteorológicas de estudio

Cuadro 17. Estaciones consideradas en la zona de estudio

Estación			Ubicación Geográfica Coordenadas Planas		Altitud	Institución propietaria
Código	**Estación**	**Tipo**	**Latitud**	**Longitud**	**m.s.n.m**	
M0770	Catacocha	CO	9 551 949 N	650 752 E	1840	INAMHI
M0760	Lauro Guerrero	PV	9 561 295 N	637 822 E	1910	Ex -Predesur

CO = Estación completa
PV = Estación pluviométrica

Cuadro 18. Precipitación Media Mensual (mm) de Estaciones Meteorológicas (período 1985 – 2009).

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
CATACOCHA	299.0	327.2	300.9	271.4	94.3	17.6	6.8	8.0	4.5	27.9	27.4	118.7	1503.6
LAURO GUERRERO	**246.3**	**317.4**	**324.8**	**187.4**	**72.7**	**18.3**	**5.9**	**1.9**	**7.6**	**30.2**	**28.4**	**104.2**	**1345.1**

Elaborado: CLIRSEN-MAGAP, 2012

Cuadro 19. Temperatura Media Mensual y Anual (°C) (período 1985 – 2009).

CODIGO	ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
M515	**CATACOCHA**	17.7	17.7	17.5	17.8	18.2	18.4	18.6	18.6	18.8	18.8	18.5	18.4	18.2

Fuente: Información Meteorológica del INAMHI

Elaborado: CLIRSEN-MAGAP, 2012