

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Agrícola



“Diseño de un sistema integrado de riego superficial (surcos, melgas y cuadros) en el terreno designado como área experimental de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.”

Informe del Trabajo Final de Graduación para optar por el título de Ingeniero Agrícola con el grado académico de Licenciatura

Carlos G. Acuña Ramírez

Cartago, junio, 2014

Diseño de un sistema integrado de riego superficial (surcos, melgas y cuadros) en el terreno designado como área experimental de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

Carlos G. Acuña Ramírez

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

Ing.Milton Solórzano Quintana,MBA

Asesor - Lector

Ing.Marvin Villalobos Araya,M.Sc

Director Escuela

Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2014

DEDICATORIA

A mis padres, Carlos y Elizabeth por sus enseñanzas y haberme inculcado responsabilidad, honestidad, y amor y por estar en todo este tiempo siempre a mi lado, y en toda mi vida buscando siempre ayudar en lo que puedan, y sobre todo por el gran apoyo incondicional mostrado hacia mi persona.

A mi hermana Cindy, por ser gran parte importante en mi vida y haber sido uno de los ejemplos por los cuales quise superarme desde niño, ya que sin su ayuda hubiera sido más difícil.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, mi hermana, primo, mis tíos y a tita, a mis amigos y los compañeros que siempre creyeron en mí y mostraron preocupación e interés por mis logros y fallas.

A mi novia Kari, que gracias a ella logré seguir adelante cada vez que se me empezaba a nublar el camino y por todo lo que hemos vivido y su amor y fe en mí, que con ellos, me fortalecí y aprendí a nunca rendirme.

A mis profesores, los cuales siempre me tendieron la mano cuando los necesité, y por traspasar sus conocimientos con el interés de que uno llegara a ser un buen ejemplar como profesional, y como persona.

A mi amigo e ingeniero agrónomo, M.Sc y de la Escuela de Ingeniería en Agronegocios, don Luis, por siempre brindarme apoyo cuando lo necesité, en todo lo relacionado a la vida y el estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1. Riego Agrícola	7
3.2. Riego superficial	7
3.3. Movimiento de tierras.....	8
3.4. El suelo	10
3.4.1. Propiedades físicas del suelo	11
3.4.1.1. Granulometría y textura.....	11
3.4.1.2. La estructura.....	12
3.4.1.3. Materia orgánica	13
3.4.1.4. Peso específico aparente (Pe).....	13
3.5. Profundidad de enraizamiento.....	14
3.6. Infiltración del agua en el suelo	15
3.6.1. Infiltración instantánea y acumulada.....	16
3.6.2. Infiltración básica.....	16
3.6.3. Métodos para medir la infiltración del agua en el suelo.....	17
3.6.4. Ecuación de Kostiakov.....	19
3.7. Disponibilidad de agua en el suelo	22
3.7.1. Niveles de humedad en el suelo	22

3.7.2. Coeficientes hídricos del suelo.....	23
3.7.3. Determinación de los coeficientes hídricos: capacidad de campo y punto de marchitez permanente.	24
3.7.3.1. Método de platos de cerámica y ollas de presión.....	24
3.8. Necesidades de riego	27
3.8.1. Lámina de agua	27
3.8.2. Lámina máxima.....	27
3.8.3. Lámina neta a aplicar o Dosis neta (Lámina de riego)	28
3.8.3.1. Agotamiento permisible	28
3.8.4. Frecuencia y periodo de riego	30
3.8.4.1. Frecuencia de riego	30
3.8.4.2. Tiempo de riego	31
3.8.5. Lámina bruta o Dosis bruta de riego.....	31
3.8.5.1. Eficiencia global de riego	31
3.9. Evapotranspiración real	32
3.9.1. Evapotranspiración potencial (ET_0).....	33
3.9.2. Coeficiente del cultivo (K_c).....	34
3.9.3. Cálculo de la evapotranspiración potencial: Método de Hargreaves..	35
3.10. Caudal requerido	36
3.11. Precipitación efectiva y Déficit de agua.	36
3.11.1. Evapotranspiración real del cultivo (E_{tr}) para todo su ciclo:.....	37
3.11.2. Precipitación efectiva (PD):.....	37
3.12. Métodos de Riego superficial	39
3.12.1. Riego por surcos	39

3.12.1.1. Diseño de riego por surcos	43
3.12.2. Riego por melgas	52
3.12.2.1. Diseño de un sistema de riego por melgas	54
3.12.3. Riego por cuadros	65
3.12.3.1. Diseño de riego por cuadros: Método de Booher	67
4. METODOLOGÍA	70
4.1. Localización y plazo utilizado para el estudio	71
4.2. Levantamiento topográfico y preparación del terreno.....	71
4.3. Muestreo de suelos y análisis de muestras de suelo recolectadas en el campo	72
4.3.1. Pruebas de laboratorio	72
4.4. Pruebas de infiltración.....	77
4.5. Recaudación de datos climatológicos de la estación meteorológica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	79
4.5.2. Análisis de los datos climatológicos	79
4.6. Diseño de sistemas de riego superficial	80
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	82
5.1. Tipo de estudio.....	83
5.2. Presentación de planos topográficos.....	83
5.3. Movimiento de tierras.....	86
5.4. Obtención de las muestras de suelo y pruebas de infiltración	101
5.5. Granulometría y contenidos de humedad del suelo.	103
5.6. Pruebas de infiltración.....	106
5.6.1. Prueba de infiltración para el terreno A ₁	106

5.6.2. Pruebas de infiltración para el terreno A ₂	110
5.7. Diseño de los sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros	111
5.7.1. Criterios generales para diseño.....	111
5.7.2. Capacidad del reservorio de donde se tomará el agua.	113
5.7.3. Cálculo de la evapotranspiración real del cultivo	113
5.7.4. Distribución de los sistemas.....	115
5.7.5. Diseño de sistema de riego por surcos	117
5.7.6. Diseño del sistema de riego por melgas	125
5.7.7. Diseño de riego por cuadros: Método de Booher	133
5.7.7.3. Funcionamiento del sistema	138
5.7.8. Suministro del agua hacia las estructuras de riego.....	139
5.7.9. Zanja de drenaje	142
5.7.10. Diseño en planta de los sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros...	145
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	147
7. BIBLIOGRAFÍA	150
ANEXOS	155

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3. 1	Grados de nivelación según la topografía del terreno (Fuente: Lázaro, <i>et al</i> 2010).....	10
Cuadro 3. 2	Opción para tabulación de datos en una prueba de infiltración (Adaptado de Villalobos 2008)	21
Cuadro 3. 3	Rangos de valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente según la textura del suelo (Fuente: Grassi 1987)	23
Cuadro 3. 4	Parámetros de humedad según textura del suelo (Fuente: Cisneros 2003).....	24
Cuadro 3. 5	Agotamiento permisible para diferentes cultivos y rango de profundidad radicular efectiva máxima en metros en suelos sin restricciones al crecimiento de las raíces (Fuente: Allen, <i>et al</i> 2006)	29
Cuadro 3. 6	Métodos para obtener la evapotranspiración potencial según dato climático (Fuente: Cisneros 2003)	33
Cuadro 3. 7	Coefficiente K_c para varios cultivos	35
Cuadro 3. 8	Algunos de los coeficientes K_c para la ecuación de Hargreaves.....	36
Cuadro 3. 9	Eficiencias de riego recomendadas para surcos. (Fuente: Cisneros 2003).....	41
Cuadro 3. 10	Valores de C y a según el tipo de suelo	46
Cuadro 3. 11	Valores de infiltración y clasificación según textura del suelo (Cisneros 2003).....	47
Cuadro 3. 12	Infiltración básica en l.p.s/100 m de surco (Fuente: Villalobos 2008)	48
Cuadro 3. 13	Factor f según textura del suelo (Fuente: Villalobos 2008)	48
Cuadro 3. 14	Eficiencias recomendadas para el diseño de riego por melgas (Fuente: Cisneros 2003)	55
Cuadro 3. 15	Anchos recomendados para melgas (Fuente: Villalobos 2005)	56

Cuadro 3. 16 Normas generales para el diseño de riego superficial por melgas (Fuente: Cisneros 2003)	56
Cuadro 3. 17 Valores del coeficiente de rugosidad n (Fuente: Grassi 1987).....	61
Cuadro 3. 18 Superficie de los cuadros propuestos para diferentes tipos de suelos y caudales de agua (Fuente: Booher 1974).....	67
Cuadro 3. 19 Valores propuestos de caudal a aplicar (l/seg) por cada m^2 de superficie del cuadro, para suelos de diferente textura	67
Cuadro 5. 1 Valores necesarios para la ecuación 3.2 del método de mínimos cuadrados.....	91
Cuadro 5. 2 Valores necesarios para la ecuación 3.1 del método de mínimos cuadrados.....	91
Cuadro 5. 3 Cortes, rellenos y cotas del proyecto del área de riego del terreno A_1	94
Cuadro 5. 4 Valores necesarios para obtener la pendiente O-E.....	99
Cuadro 5. 5 Valores necesarios para obtener la pendiente N-S.....	99
Cuadro 5. 6 Cortes, rellenos y cotas del proyecto del área de riego del terreno A_2	100
Cuadro 5. 7 Nomenclatura utilizada en el plano topográfico de la figura 5.11..	101
Cuadro 5. 8 Análisis físico de los suelos del terreno A_1	103
Cuadro 5. 9 Análisis físico de los suelos del terreno A_2	103
Cuadro 5. 10 Resultados de CC y PMP obtenido mediante las ecuaciones 3.13, y el promedio entre los valores dados por las ecuaciones 3.15 y 3.16; y otros datos de interés	106
Cuadro 5. 11 Datos necesarios para el cálculo de láminas de agua.....	112
Cuadro 5. 12 Valores de láminas máximas por cada estrato de suelo	112
Cuadro 5. 13 Valores de lámina máxima y lámina neta total.....	113
Cuadro 5. 14 Valores de coeficiente del cultivo, evapotranspiración potencial y real, obtenidos por la fórmula de Hargreaves.....	114

Cuadro 5. 15 Déficit mensuales, de los meses tomados en cuenta para el ciclo del maíz de grano	115
Cuadro 5. 16 Algunas características del suelo	134
Cuadro 5. 17 Pérdidas de presión en metros por cada 100 m de tubería calculadas con la fórmula de Hazen-Williams	141
Cuadro 5. 18 Cálculo del caudal de la compuerta en L/s	142
Cuadro 5. 19 Cuadro resumen de los diseños de sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1 Triángulo de Texturas	12
Figura 3. 2 Infiltrómetro de doble cilindro	18
Figura 3. 3 Gráfica de I_i vs T_{cum} de una prueba de infiltración (Fuente: elaboración propia)	22
Figura 3. 4 Ejemplo de un sistema de riego por surcos.....	40
Figura 3. 5 Separación entre surcos.....	42
Figura 3. 6 Representación de riego por melgas (Fuente: Cisneros 2003)	53
Figura 3. 7 Caudal unitario en melgas (Fuente: Cisneros 2003)	58
Figura 3. 8 Longitudes recomendadas de melgas (Fuente: Villalobos 2005)	62
Figura 3. 9 Método de riego en cuadros (Fuente: Cisneros 2003)	66
Figura 4. 1 Ubicación del área de estudio	71
Figura 4. 2 Hornos utilizados para el secado de muestras en los procesos de obtención de textura y para obtener los coeficientes hídricos del suelo.....	73
Figura 4. 3 Muestras de suelo con CALGON y agua destilada en beaker de 400 ml cada una.....	73
Figura 4. 4 Batidora con muestra de suelo en el envase y pipeta	74
Figura 4. 5 Seis muestras de suelo en el cilindro de Bouyoucus (minutos antes de realizar la prueba).....	74

Figura 4. 6	Hidrómetro con el que se tomaron las medidas necesarias para realizar el experimento	75
Figura 4. 7	Ollas de presión y plato de porcelana (sobre la olla sin tapa)	75
Figura 4. 8	Anillos con malla, liga de hule y suelo reposando sobre agua para saturar el suelo; en una bandeja de plástico.....	76
Figura 4. 9	Bandeja de aluminio, anillo de metal y muestra de suelo (después del secado en el horno).....	76
Figura 4. 10	Nótese las muestras que fueron utilizadas son las que se encuentran en la bandeja color anaranjada	77
Figura 4. 11	Tractor que transporta los estañones de abastecimiento de agua para las pruebas de infiltración	78
Figura 4. 12	Doble cilindro infiltrómetro y regla graduada	78
Figura 5. 1	Curvas de nivel del terreno donde se realizó el estudio	84
Figura 5. 2	Plano en 3D de la superficie del terreno.....	85
Figura 5. 3	Plano topográfico del área disponible para el proyecto, con el área que va a ser utilizada para riego señalada	87
Figura 5. 4	Vista de cerca de las cuadrículas para la nivelación del terreno A_1 y su orientación	88
Figura 5. 5	Mapa del terreno total y ubicación de las cuadrículas para el terreno A_1	89
Figura 5. 6	Representación de la forma en que se trabajarán las cuadrículas	90
Figura 5. 7	Plano topográfico empleado para trabajo de nivelación del terreno, que indica cotas centroides originales de la superficie del terreno.....	90
Figura 5. 8	Vista de cerca de las cuadrículas realizadas para el área A_2	97
Figura 5. 9	Mapa del terreno total y las cuadrículas del área A_2	98
Figura 5. 10	Cotas primitivas del terreno	98
Figura 5. 11	Plano topográfico que indica los sitios donde se recolectaron las muestras de suelo y donde se realizaron las pruebas de infiltración.....	102

Figura 5. 12 Gráfica de la curva potencial de la prueba de infiltración N°1 (INFLNo.1), terreno A₁	107
Figura 5. 13 Gráfica de la curva potencial de la prueba de infiltración N°2 (INFLNo2), terreno A₁.....	107
Figura 5. 14 Plano de las áreas de riego	116
Figura 5. 15 Vista detallada del sistema de riego por surcos	125
Figura 5. 16 Vista en planta del diseño de los sistemas de riego por melgas	132
Figura 5. 17 Vista en planta de una melga (unidades están en metros)	133
Figura 5. 18 Diagrama del diseño de los cuadros para el proyecto	137
Figura 5. 19 Vista detallada del diseño en planta del sistema de riego por cuadros	139
Figura 5. 20 Dimensiones en metros de la sección transversal del canal de drenaje	144
Figura 5. 21 Zanja de drenaje.....	145
Figura 5. 22 Diseño en planta del sistema de riego integrado.....	146

RESUMEN

Se compendió la realización del diseño de un sistema integrado de riego superficial el cual contiene los sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros (pozas). En el estudio se realizaron diferentes pruebas de campo y laboratorio relacionadas al suelo necesario para diseñar dicho sistema de riego.

Se encontró que la pendiente fue factor clave en parámetros importantes tales como los caudales máximos y los que se van a aplicar en los diferentes sistemas.

El diseño de los sistemas de riego se realizó con los métodos basados en cuadros y gráficas debido a los inconvenientes que se produjeron a lo largo del estudio; dentro de los cuales caben destacar; fallos con el método de ollas de presión y el no poder haber realizado surcos provisionales para la realización de pruebas de campo.

Considerando la metodología empleada, se pudo concluir que el diseño de un sistema de riego por gravedad basado en tablas y gráficas nos arroja valores que sirven para diseño y los cuales pueden emplearse a fondo, sin embargo el éxito de un sistema prediseñado por estos métodos va a depender del efectuar las pruebas de campo y evaluaciones que nos digan si el sistema está funcionando a como debería o si se deberían de variar algunos de los parámetros clave como lo son los caudales y los tiempos de aplicación del riego.

Palabras clave: sistema de riego, surcos, melgas, cuadros, infiltración del agua en el suelo, caudales máximos

ABSTRACT

The completion of the design of an integrated surface irrigation system which contains the furrow irrigation systems, and flood irrigation systems are abridged. Various field and laboratory tests related to soil needed to design the irrigation systems were performed.

It's important to say that was found that the slope was a key factor in important parameters such as peak flows and flows that have to be applied to the different systems.

The design of irrigation systems was performed using methods based on charts and graphs because of the problems that occurred during the study; within which should be highlighted the fault with the method of pressure pots and not being able to have made provisional furrows for field testing.

Considering the methodology used, it was concluded that the design of an irrigation system by gravity based on charts and graphs throws us values that are used to design and which can be used to fund, but the success of a system predesigned by this method will depend on the conduct field tests and evaluations, those will tell us if the system is running at as it should or if it should vary some key parameters such as flow rates and times of application of irrigation.

Keywords: irrigation system, furrow irrigation, flood irrigation, water infiltration, peak flows

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío es una de las actividades que impulsaron la civilización y es la responsable del consumo del 70% del agua mundial. A diferencia de antes, ahora se nos dice que el agua es un recurso escaso, por lo tanto los riegos deben efectuarse de una manera eficiente, es decir, se debe aprovechar el agua de la mejor forma posible; lo que significa regar una mayor área con la misma cantidad de agua.

El riego consiste en reponer la humedad del suelo en cantidad y oportunidad adecuadas a fin de lograr en los vegetales el máximo rendimiento; teniendo en cuenta también aspectos económicos y propios de diseño así como la topografía del terreno, características físicas del suelo, caudal disponible y cultivo. Mientras que drenaje es parte integrante del sistema de riego. Es la evacuación de los excesos de agua de la zona de absorción, con el fin de evitar la saturación del suelo.

La iniciativa de este proyecto nace debido a la necesidad de la Escuela de Ingeniería Agrícola por contar con un área que combine el poder realizar prácticas de riego agrícola, todo esto con fines docentes y de investigación; también es importante el realizar un diseño de riego, es decir, un sistema eficiente y con el menor gasto de recursos económicos (agua, mano de obra, materiales, etc.) para maximizar el uso del riego en el país.

El trabajo se realizó en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en la sede central de Cartago, en el terreno que se le fue entregado a la Escuela de Ingeniería Agrícola, el cual es de una extensión aproximadamente de tres hectáreas y localizado al sur cercano a la laguna pequeña para uso agrícola en el campo destinado a las escuelas de Ingeniería Agrícola y de Agronegocios.

Además se sabe que el suelo es de textura arcillosa, según las características de la región, sin embargo se determinó la textura y la granulometría del suelo para lograr confirmar lo dicho.

El campo de estudio está distribuido en dos áreas separadas por un talud, las cuáles serán estudiadas y por ende se utilizarán para realizar los diseños de los sistemas de riego superficial en caso de que sea conveniente. Debido a la elevada pendiente en la región del

terreno de estudio, se estudiará la factibilidad de implementar varios métodos de riego superficial en la región del terreno que presente mejores condiciones para esto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- a) Diseñar un sistema integrado de riego superficial para las áreas de práctica de la Escuela de Ingeniería Agrícola.

2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la cantidad de tierra que debe de ser movida en el campo para implemente el sistema integrado de riego superficial.
- b) Hallar las propiedades hídricas del suelo y basado en esto realizar el diseño de los sistemas de riego.
- c) Diseñar el sistema de riego por surcos, melgas y cuadros en sus respectivas áreas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Riego Agrícola

El riego se define como la aplicación sistemática del agua adicional a la precipitación a la zona radicular del cultivo para su crecimiento óptimo y también para cubrir las necesidades de lavado de sales y así evitar su acumulación en el perfil del suelo, asegurando la sostenibilidad del regadío (Faci y Playán 1996). Se aplica riego solamente cuando el agua de precipitación es escasa o su distribución no coincide con los períodos de máxima demanda de las plantas, y por lo tanto es necesario aportarla artificialmente (Cisneros 2003).

Para lograr esto existen diversos métodos de riego que se encuentran dentro de dos grandes clases las cuales son: riego superficial o por gravedad (la cual es el de interés), y el riego a presión.

3.2. Riego superficial

También llamado riego por superficie o riego por gravedad, incluye una variedad de métodos de riego que tienen la característica común de que el agua se aplica en la superficie del suelo y se distribuye en el campo por gravedad, y que también el caudal de riego disminuye a lo largo del campo debido a la infiltración del terreno (Faci y Playán 1996; Pascual 2008).

Dentro de este tipo de riego, se han distinguido 3 métodos, entre los cuales se encuentran, riego por melgas (border, a manta, tablares, fajas, amelgas, bordes), sumersión o inundación y surcos (Booher 1974; Israelsen y Hansen 1979; Ollier y Poiree 1981; Finkel 1982).

Previo a la instalación del riego superficial se debe realizar una nivelación del terreno para así ajustar las pendientes que se necesitan para que el desplazamiento del agua sobre el sistema no produzca efectos erosivos sobre el terreno. Para entender esto primero se explicará brevemente la forma correcta para la nivelación de un terreno y el método recomendado.

3.3. Movimiento de tierras

Para la nivelación del terreno por medio del movimiento de tierras, se puede utilizar el método de mínimos cuadrados, el cual consiste en cortar el mínimo volumen de tierra para obtener una pendiente que se ha establecido previamente partiendo de una cota promedio (centroide) y es el método más preciso aunque el más laborioso (Sanchez y Peralta 2011).

Para la utilización de este método se deberán primero de realizar los siguientes pasos:

- a) Llevar a cabo una cuadrícula del terreno
- b) Calcular la cota del centroide de cada cuadrícula mediante la sumatoria de la cota de cada esquina dividida por 4
- c) Calcular la cota del centroide del terreno de la siguiente manera:
 - Sumar de modo independiente las cotas de las columnas
 - Sumar de modo independiente las cotas de las filas
 - Obtener la altura media de cada columna y de cada fila
 - Hacer una sumatoria de las cotas medias de las columnas y de las filas
 - Obtener la cota del centroide dividiendo la sumatoria de las alturas medias por número de filas o columnas

Luego de obtener estos resultados se procede a encontrar la pendiente natural media del terreno, la cual en caso de ser excesiva se debe de elegir una pendiente más leve para encontrar las nuevas cotas del terreno y hacer la nivelación. El método de mínimos cuadrados es un método estadístico y utiliza las siguientes expresiones matemáticas para encontrar la pendiente:

$$S_{N-S} = \frac{\sum(h * y) - \frac{\sum(h) * \sum(y)}{n}}{\sum(y^2) - \frac{(\sum y)^2}{n}} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$S_{O-E} = \frac{\sum(h * x) - \frac{\sum(h) * \sum(x)}{n}}{\sum(x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n}} \dots \dots \dots (3.2)$$

Donde:

S_{N-S} = pendiente de norte a sur

S_{O-E} = pendiente de oeste a este

$\sum(h)$ = sumatoria de cotas, de las filas si es de oeste a este, o de la columnas si es la pendiente de norte a sur.

$\sum(y)$ o $\sum(x)$ = orden de las cotas contadas a partir del norte y oeste respectivamente.

Ahora bien, partiendo de que ya se obtuvieron las pendientes naturales del terreno y se ha elegido con cuales pendientes se va a realizar la nivelación, para el cálculo de las cotas nuevas del proyecto, se realiza el siguiente cálculo:

$$Cota\ del\ proyecto = Hm \pm P_{O-E} * Xc \pm P_{N-S} * Yc \dots \dots \dots (3.3)$$

Donde:

Hm = cota del centroide

Xc = coordenada del punto referida al centroide, según el eje O-E.

Yc = coordenada del punto referida al centroide, según el eje N-S.

Para determinar el corte y el relleno que se deben de aplicar, esto depende de según sean las cotas nuevas y originales que se tengan, ya que al restarse las *cotas del proyecto* menos las cotas originales promedios obtenidas en el paso (b) (*Calcular la cota del centroide de cada cuadrícula mediante la sumatoria de la cota de cada esquina dividida por 4*) su resultado determinará cuanto ha de cortarse (valor negativo) o de rellenar (valor positivo).

La relación entre cortes y rellenos ideal (perfecta) es 1, sin embargo en la práctica se trata que sea un valor superior a éste, para en caso de tener un leve excedente en tierra para relleno en caso de que falte. Una relación de corte y relleno similar o mayor a 1,5 se considera como un valor excesivo (Lázaro, *et al* 2010).

La nivelación de tierras puede ser de primero, segundo o tercer grado según la condición topográfica original del terreno por nivelar y las pendientes del proyecto. Estos grados se describen a continuación en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. 1 Grados de nivelación según la topografía del terreno (Fuente: Lázaro, *et al* 2010)

Grado de Nivelación	Topografía	Observación
Primer Grado	Semejante y bastante uniforme	No se efectúan cálculos previos de plano y cotas proyecto, y no se modifican las pendientes naturales del terreno.
Segundo Grado	Con irregularidades aisladas	Es obligatorio efectuar un proyecto cuidadoso de los cortes a realizar y de los volúmenes a mover, pero no deben hacerse modificaciones a las pendientes naturales del terreno.
Tercer Grado	Bastante irregular	Con frecuencia se tiene que modificar, al menos en la dirección del riego, la pendiente natural del terreno.

También como dato importante, se tiene que una nivelación es importante cuando se tiene que mover más de 700 m³/ha, una nivelación media va de 350 – 700 m³/ha y ligera de 150-350 m³/ha (Sanchez y Peralta 2011); esto significa, que para ciertos trabajos si se mueve más de 700 m³/ha de tierra, la inversión no sería rentable (Lázaro, *et al* 2010).

3.4. El suelo

Para realizar un diseño de riego superficial se requiere primeramente de cierta información sumamente importante la cual está relacionada con: el suelo donde se desee implantar el sistema de riego, y las necesidades de los cultivos (Pascual 2008).

Según Booher (1974), las dos características más importantes del suelo para diseñar un sistema de riego son: la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua, pero

para hablar de estos 2 últimos términos, primero se necesita estudiar los principales aspectos de un suelo, los cuales inciden notablemente sobre la capacidad de retención de agua.

3.4.1. Propiedades físicas del suelo

3.4.1.1. Granulometría y textura

La granulometría hace referencia a la distribución de las partículas (arena, limo y arcilla) y a sus fracciones de arena fina, gruesa, etc. La primera división de las partículas es hecha a los 2 mm, de diámetro aparente, los elementos gruesos (mayores de 2 mm) y la fracción de tierra fina (menor de 2 mm). La fracción de tierra fina controla muchas propiedades de los suelos por tener mayor área superficial y propiedades químicas y biológicas activas (Porta, *et al* 1999; Singer y Munns 1999). La fracción de tierra fina ha sido dividida de acuerdo a su diámetro por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de la siguiente manera: arena (0,05-2 mm), limo (0,002-0,05 mm) y arcilla (menos de 0,002 mm). Las propiedades minerales cambian según decrece el tamaño entre 0,001 a 0,005 mm (Singer y Munns 1999).

La textura es una de las propiedades más importantes del suelo y que incide en muchas otras características o propiedades de los suelos. En el riego y el drenaje, la textura juega un papel fundamental, en el cálculo de láminas de riego, de lavado, en el proyecto y diseño de sistemas de riego y de drenaje (Cisneros 2003). Esto tiene gran efecto sobre la capacidad de retención del agua ya que el agua es retenida en forma de película sobre la superficie de las partículas y en los poros existentes entre ellas; es por ello que los suelos con textura fina (arcillosa) presentan una elevada retención de agua, mayor que la de los suelos con textura gruesa (arenosos) (Pascual 2008).

Para determinar cuál es la textura del suelo, existe el método del Hidrómetro de Bouyocuos. El cual consiste en que con las muestras disturbadas recolectadas del campo; se determina el peso específico de la solución del suelo a intervalos prefijados por medio del cilindro de Bouyocuos. Y luego según el porcentaje con base a peso de cada fracción del suelo

y la ayuda del triángulo de texturas (Figura 3.1), se define la textura del suelo. El procedimiento completo se recomienda buscar en: Forsythe (1975), Honorato (2000), Ortiz y Ortiz (1988).

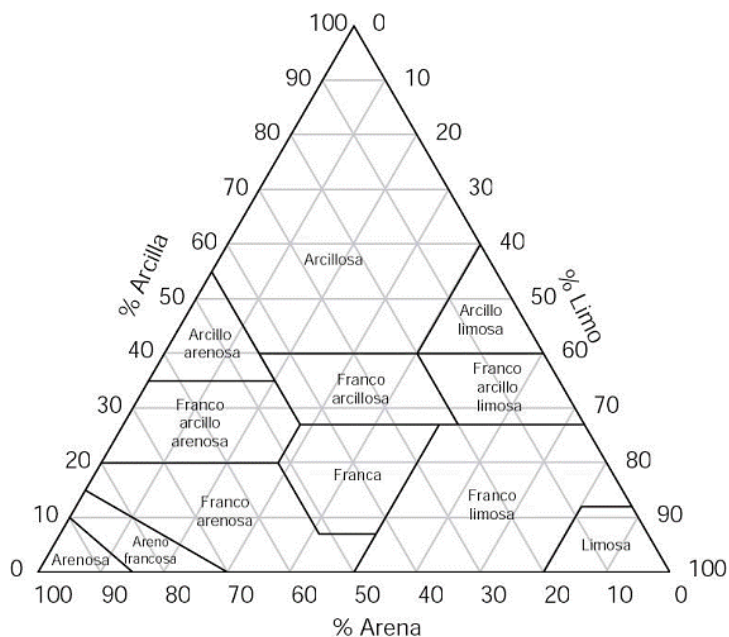


Figura 3.1 Triángulo de Texturas

3.4.1.2. La estructura

La estructura afecta la infiltración del agua, el drenaje, la aireación y el desarrollo de las raíces, incidiendo así en la productividad del suelo y las facilidades de la labranza (Porta *et al* 1999). También ésta tiene una gran importancia en la retención de agua, de tal manera que los suelos con buena estructura presentan un gran volumen de poros de todos los tamaños (tanto macro como micro-poros), presentando una buena capacidad de retención de agua y una aireación adecuada (Pascual y Noguera 1987; Cisneros 2003).

Honorato (2000) define y describe las siguientes características que presentan las estructuras del suelo. La estructura corresponde a la forma en que se agrupan las partículas

elementales (arena, limo y arcilla) en agregados, y puede describirse según: Tipo (forma y arreglo de los agregados), Clase (tamaño) y Grado (fuerza de agregación, estabilidad de agregados).

3.4.1.3. Materia orgánica

Altas proporciones de materia orgánica sin descomponer propician que una mayor cantidad de agua entre al suelo (Ortíz y Ortíz 1980), también según Pascual y Noguera (1987), un suelo con mayor contenido de materia orgánica tiene mayor capacidad de retención de agua que otro suelo pobre en materia orgánica.

También altos contenidos de materia orgánica hacen que se dé una mayor velocidad de infiltración en el suelo, además de servir como cobertura y por lo tanto evitar la erosión provocada por el agua (Honorato 2000).

3.4.1.4. Peso específico aparente (Pe)

También llamado densidad aparente de un suelo, se define como el cociente que resulta de dividir el peso de suelo seco entre el volumen total, incluyendo los poros y usualmente se expresa en gr/cm^3 (Cisneros 2003). Cuando se trabaja en suelos que serán utilizados para el implemento de sistemas de riego, se dice que es necesario conocer el peso específico aparente ya que es indispensable para: *“calcular el agua de riego puesto que es imposible medir por medios directos el volumen del agua que existe en forma de humedad del suelo, en un volumen dado del mismo.”* (Israelsen y Hansen 1979:147).

Se puede obtener por diferentes métodos, pero el que resulta de interés es el método de campo utilizando cilindros de volumen conocido.

El método consiste en tomar muestras indisturbadas de suelo a una profundidad deseada, mediante cilindros muestreadores y una vez se tiene la muestra en el laboratorio primero se llevará el suelo a una humedad de capacidad de campo y luego se pondrá a secar a 105°C durante 24 horas para después pesarse mediante una balanza analítica. Luego de esto se calculará el Pe mediante la siguiente relación:

$$Pe = \frac{Pss}{(\pi * D^2 * h)/4} \dots \dots \dots (3.4)$$

Donde:

Pss= es el peso del suelo seco (g/cm³)

($\pi * D^2 * h$)/4= volumen del cilindro (cm³)

Los valores del peso específico aparente varían en función de las propiedades de los suelos fundamentalmente con la textura y el contenido de materia orgánica. Sin embargo como valores medios se tienen los siguientes (Cisneros 2003):

- Arenas 1,4 – 1,6 gr/cm³
- Francos 1,3 – 1,4 gr/cm³
- Arcillas 1,1 – 1,3 gr/cm³
- Suelos orgánicos 0,7 – 1,1 gr/cm³

3.5. Profundidad de enraizamiento

Es necesaria para así conocer el agua útil del suelo; y corresponde a la profundidad de enraizamiento de la planta a cultivar. Para efectos del diseño de riego no se considera la profundidad total de enraizamiento ni la profundidad de cada perfil del suelo necesariamente, sino más bien a lo que le llama la profundidad efectiva la cual para algunos autores según Pascual (2008), corresponde a el 75% de la profundidad máxima de raíces y para otros es del 70 al 90%.

Según la textura del suelo se puede decir que para cada tipo de cultivo existen diferentes profundidades a las que las raíces pueden llegar, por ejemplo según Grassi (1987), Ollier y Poiree (1981), para cultivos permanentes en suelos medios pueden tener de 1,5 a 2 m de profundidad, para cereales de 0,6 – 1 m y para hortalizas de 35-50 cm; mientras que en suelos arcillosos esto cambia notablemente, teniendo así para cultivos permanentes

profundidades de 67 cm, en cereales y cultivos industriales se consideran no más de 50 cm y para cultivos hortícolas se habla de no más de 25 cm (Thorntwaite y Mather 1957).

En las plantas el 40 % del agua extraída se absorbe en el primer cuarto de profundidad y en el segundo cuarto el 30%, de forma que un 70 % del agua absorbida se extrae en la mitad más superficial de la zona radicular (Pascual 2008). El agua se agota con mayor rapidez en las capas más superficiales, cuando se agota ésta la planta extrae el agua de capas más profundas, para ello necesita desarrollar su sistema radicular (Doorenbos y Kassam 1979). Conviene, en consecuencia, reponer el agua absorbida en la zona superficial que es donde el sistema radicular alcanza mayor desarrollo y donde mayor es la extracción. En la práctica numerosos autores, consideran una profundidad de 30-50 cm cuando se dan riegos por gravedad y por aspersión.

3.6. Infiltración del agua en el suelo

El significado de infiltración del agua en el suelo se refiere a: *“la velocidad de entrada del agua en el suelo. La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina de agua que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo, se expresa generalmente en cm/hr o cm/min”*. (Cisneros 2003:25)

Ortiz y Ortiz (1980), mencionan que los factores principales que determinan la magnitud del movimiento del agua por infiltración son:

- a) Textura: Los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. En un suelo arenoso se favorece la infiltración es decir los valores de infiltración o tasa de infiltración son muchos más altos.
- b) Estructura: Suelos con grandes agregados estables en agua tienen proporciones de infiltraciones más altas.
- c) Cantidad de materia orgánica: Alta cantidad de materia orgánica sin descomponer produce que haya una mayor tasa de infiltración.

- d) Profundidad del suelo a una capa endurecida, lecho rocoso u otras capas impermeables influyen en la infiltración: Los suelos delgados almacenan menos agua que los suelos profundos.
- e) Cantidad de agua en el suelo: En general un suelo mojado tendrá una menor infiltración que un suelo seco.
- f) Temperatura del suelo: Los suelos calientes permiten mayor infiltración del agua que los suelos fríos.
- g) Cantidad de organismos vivos: A mayor actividad microbológica en los suelos habrá una mayor infiltración. Un caso típico es la elaboración de pequeños túneles por las lombrices, los cuales favorecen la infiltración y la penetración de las raíces así como la aireación.

3.6.1. Infiltración instantánea y acumulada

La infiltración instantánea, también conocida como velocidad de infiltración o velocidad de entrada (Pascual 2008), es la velocidad a la que el agua penetra en el suelo (Grassi 1988), y esto determina el tiempo durante el cual ha de mantenerse el agua sobre la superficie para que alcance la profundidad conveniente (Booher 1974).

Por otro lado la infiltración acumulada a diferencia de la infiltración instantánea, no demuestra una velocidad, sino más bien una altura; y se define como una lámina acumulada que aumenta conforme avanza el tiempo.

3.6.2. Infiltración básica

El riego se realiza normalmente cuando el suelo está bastante seco y la planta necesita agua. En estas condiciones, la infiltración es bastante rápida ya que los poros tienen poca cantidad de agua en su interior y el suelo es capaz de infiltrarla con facilidad. A medida que los poros se van llenando de agua, ésta se hace más lenta y si la infiltración prosigue durante

un tiempo prolongado, el agua termina por infiltrarse a un ritmo muy lento que prácticamente no cambia, representado por la llamada infiltración básica (Leitón 1985; Valverde 2007).

También según Pascual (2008), el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos la define como el valor instantáneo de la infiltración cuando la variación de la velocidad es 10% o menos de su valor.

Según la textura de los suelos, los arenosos infiltran el agua rápidamente y tienen una mayor infiltración básica. Contrario a los arcillosos los cuales infiltran muy lentamente incluso al comienzo y tienen una infiltración básica muy baja, de ahí que suelen generar problemas de encharcamiento. Debido a que en los suelos arenosos se produce un movimiento del agua vertical, motivo por el cual los suelos arenosos suelen generar filtración profunda cuando hay un exceso de agua mientras que en los suelos arcillosos el agua se mueve también lateralmente mientras que el movimiento hacia capas más profundas está más limitado, esto supone que en sistemas de riego por superficie con suelos arcillosos sean necesarios tiempos de infiltración relativamente elevados para conseguir aportar al suelo la altura de agua correspondiente a la lámina requerida, esto es, la lámina de agua que es necesario aplicar con el riego (Fernández 2010).

3.6.3. Métodos para medir la infiltración del agua en el suelo

Para medir la infiltración, se puede utilizar el surco infiltrómetro introducido por Bondurant (1957), con el cual se mide la infiltración durante todo el tiempo que dura el riego encharcando agua en una longitud muy corta del surco; y por otro lado y de mayor interés es el método de cilindros infiltrómetros (Villalobos 2008) o infiltrómetro de doble cilindro (Cisneros 2003).

El método consiste en: *“instalar en el terreno que se requiere determinar su infiltración, en un sitio característico y previamente limpiado de hierbas, desechos, piedras, etc., dos cilindros concéntricos de acero, huecos en el centro, con medidas aproximadas de 40 cm de alto, de 30 y 45 cm de diámetro respectivamente”*. (Cisneros 2003:26).

En la siguiente figura se puede observar su instalación:

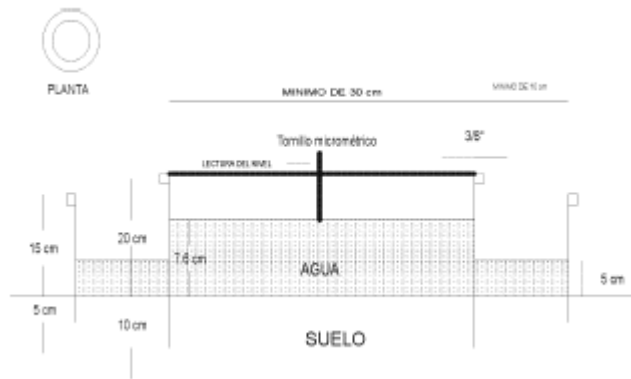


Figura 3. 2 Infiltrómetro de doble cilindro (Cisneros 2003)

Una vez instalados los anillos, se llena con agua el cilindro exterior, se vierte agua en el cilindro interior y se mide el tirante o la altura de la columna de agua con ayuda de una regla y se toma el tiempo en que tarde en infiltrarse cierta cantidad de agua en el suelo. Se agrega agua cada vez que el nivel de agua varíe. Después de cierto tiempo cuando el nivel del agua varíe poco o nada, la prueba habrá terminado.

Se dice que las velocidades de infiltración básica por hora para algunos suelos arenosos gruesos pueden alcanzar hasta 25 cm; para francos desde 1 a 10 cm, mientras que para los arcillosos desde 0,1 hasta 2,5 cm como valor máximo (Booher 1974). Para en caso de éste último tipo de suelo según textura, se habla de que el rango puede comprender de 0,1 a 0,5 cm/h (Brouwer; *et al*, citado por Villalobos 2008) mientras que Cisneros (2003) propone valores menores de 0,25 que pueden llegar hasta 0,8 cm/h.

La importancia de cómo obtener esta medida y de saber todo lo referente con esta propiedad física radica en que el caudal de agua necesario y el área regada considerada como una unidad de riego han de ajustarse de acuerdo con la velocidad de infiltración del suelo (Cisneros 2003).

Una de las utilidades de la realización de las pruebas de infiltración, es la de que por medio de ellas se puede obtener la infiltración básica de un suelo, así como las ecuaciones de infiltración acumulada, instantánea y promedio. Las cuales para cada método de riego tienen su funcionalidad y serán vistas más adelante.

Para obtener la ecuación de la infiltración, existen diferentes métodos como por ejemplo el de Horton, Philips, y entre estas, la más popular la cual es la del modelo de Kostiakov, la cual será vista a continuación (Villalobos 2008).

3.6.4. Ecuación de Kostiakov

Se conocen varias fórmulas desarrolladas por diferentes investigadores que se han realizado con el fin de expresar la infiltración en función del tiempo, pero la de interés para nuestro caso será la ecuación de Kostiakov (Pascual 2008; Cisneros 2003; Villalobos 2008). A continuación se tienen las ecuaciones de la infiltración instantánea (I_i), acumulada (I_{cum}) y básica (I_b); según el modelo de Kostiakov.

$$I_i = a * t^b \dots \dots \dots (3.5)$$

$$I_{cum} = \frac{a}{b + 1} * t^{b+1} \dots \dots \dots (3.6)$$

$$I_b = a(-600b)^b \dots \dots \dots (3.7)$$

Donde:

I_i, I_b = están dadas en cm/h o mm/h

I_{cum} = está dada en mm o cm.

t = tiempo de infiltración en min ó h

a = coeficiente que representa la infiltración instantánea cuando el valor de $t = 1$

b = exponente adimensional, siempre es negativo y varia entre 0 y -1

La importancia de obtener la ecuación de la infiltración instantánea (3.5), está en que después de calcular los parámetros “a” y “b” de dicha ecuación, estos mismos valores son los que se utilizan para la ecuación 3.7 de la infiltración base, y por lo tanto substituyendo estos

en dicha ecuación se logra determinar su valor. Además también se puede observar en la ecuación de la infiltración base, que el tiempo para este caso el cual es el tiempo base, según dicha fórmula viene dado de la siguiente manera:

$$t_b = -600 * b \dots \dots \dots (3.8)$$

Donde:

t_b = tiempo base en minutos

b = exponente obtenido de la ecuación de la infiltración instantánea (adimensional y siempre negativo)

Además de las ecuaciones anteriores, existe otra de igual importancia, la cual es la de la infiltración promedio, y ésta se define como el cociente entre la infiltración acumulada y el tiempo correspondiente, y viene dada de la siguiente manera (Pascual 2008):

$$Ip = \frac{a}{b + 1} * t^b \dots \dots \dots (3.9)$$

Donde I_p es la infiltración promedio de entrada de agua en el suelo y los coeficientes “a” y “b” son los mismos que se obtuvieron para la infiltración instantánea.

Para un análisis simple y conciso a partir de los datos tomados en el campo de las pruebas de infiltración por el método de los cilindros infiltrómetros, se puede generar un cuadro similar al siguiente.

Cuadro 3. 2 Opción para tabulación de datos en una prueba de infiltración (Adaptado de Villalobos 2008)

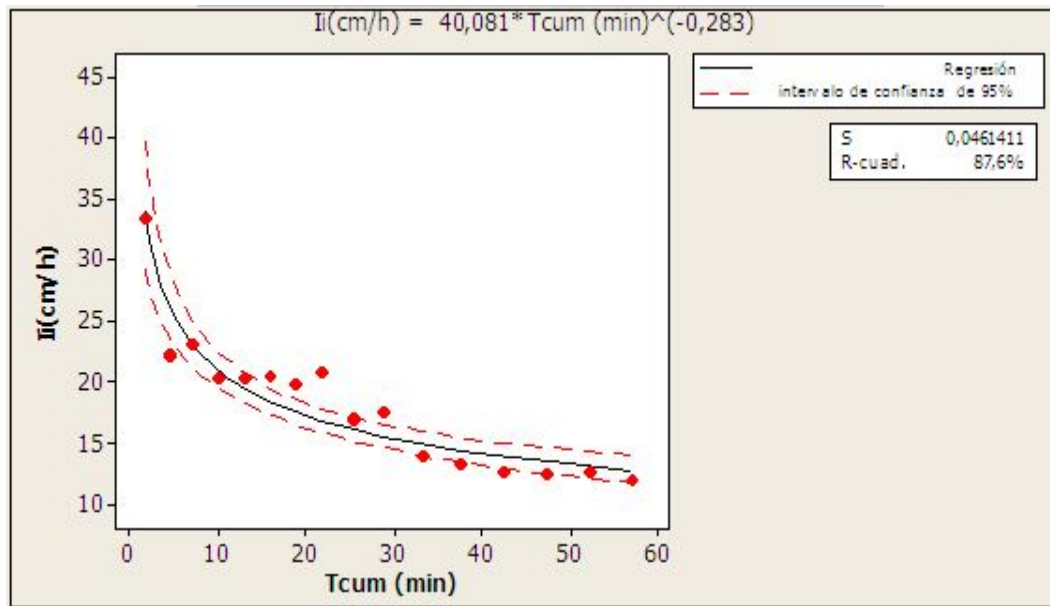
Intervalo tiempo (min) (1)	Tiempo acumulado (min) (2)	Tiempo promedio acumulado (min) (3)	Lámina infiltrada(mm) (4)	Lámina acumulada(mm) (5)	Ii (mm/h) (6)

De esta manera, de acuerdo a Villalobos (2008), se puede obtener la ecuación de la infiltración instantánea de la siguiente manera:

- a) Primero se divide la columna (4) entre la columna (1) y multiplicando por 60 para obtener la infiltración instantánea (columna (6) en mm/h.
- b) Para obtener el tiempo promedio acumulado; éste se determina dividiendo la columna (1) entre 2 y luego sumándole el tiempo acumulado anterior.

De este modo, graficando infiltración instantánea (Ii) obtenida en la columna (6) contra el Tiempo promedio acumulado (Tcum) de la columna (3) se obtiene una gráfica similar a la que se muestra en la figura 3.2 y su respectiva ecuación, la cual es la ecuación de la infiltración instantánea (Ii).

Por medio de programas estadísticos como Excel o Minitab por ejemplo, se pueden obtener las ecuaciones de la infiltración así como sus gráficas. A modo de ilustración, a continuación se muestra una gráfica con su respectiva ecuación, de una prueba de infiltración, en donde además también se muestran otros valores no menos importantes, como intervalos de confianza (línea punteada) y la línea ajustada de regresión potencial.



Minitab 16

Figura 3.3 Gráfica de Ii vs Tcum de una prueba de infiltración (Fuente: elaboración propia)

3.7. Disponibilidad de agua en el suelo

3.7.1. Niveles de humedad en el suelo

Es necesario saber que el suelo funciona como un depósito natural para las plantas, ya que aunque las lluvias caen de manera intermitente las plantas consumen el agua de una manera continua y gracias al suelo es que pueden alimentarse de manera regular y proseguir con su crecimiento. Esta es la razón por la cual el suelo tiene el rol de un depósito de alimentos y agua donde las plantas toman lo que necesitan (Israelsen 1950).

Para conocer la disponibilidad de agua del suelo, así como el intervalo entre riegos, Pascual (2008) dice que se necesita conocer previamente la disposición de los horizontes en el perfil, el espesor, la textura y estructura de los mismos, junto con su velocidad de agotamiento.

Con el propósito de conocer la disponibilidad de agua en el suelo, se necesita establecer y conocer los límites de contenido de humedad, los cuales son definidos como coeficientes hídricos o parámetros hídricos (Valverde 2007).

3.7.2. Coeficientes hídricos del suelo

Se sabe que las plantas como máximo de agua disponen de un intervalo comprendido entre la humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento permanente (PMP), denominado agua útil, agua disponible o humedad aprovechable (Cisneros 2003; Pascual 2008).

La capacidad de campo es el máximo contenido de agua que puede retener un suelo después de haber drenado libremente. Aunque depende del tipo de suelo, después de la saturación, el drenado libre dura aproximadamente entre uno a tres días después de haberse concluido el riego (Israelsen y Hansen 1979).

El punto de marchitez permanente es el porcentaje de humedad retenida a una tensión aproximada de 15 atm en la cual las plantas no pueden reponer el agua suficiente para recobrar su turgencia y la planta se marchita permanentemente (Gurovich 1985). En otras palabras representa al agua no disponible, es decir, agua que se encuentra fuertemente retenida por diferentes fuerzas y que a las plantas se les dificulta su aprovechamiento (Valverde 2007).

Grassi (1987) propone los siguientes rangos de valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, ambos en base a suelo seco, y de acuerdo a las diferentes texturas que tenga el suelo, que pueden tener los diferentes tipos de suelos:

Cuadro 3. 3 Rangos de valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente según la textura del suelo (Fuente: Grassi 1987)

Textura del suelo	Capacidad de campo(%)	Punto de marchitez permanente (%)
Arenoso	6 - 12	2 - 6
Franco arenoso	10 - 18	4 - 8
Franco arcilloso	23 - 31	11 - 15
Arcillo arenoso	27 - 35	13 - 17
Arcilloso	31 - 39	15 - 19

Sin embargo en la práctica y experiencias desarrolladas por otros investigadores se pueden obtener valores alejados de los anteriores, como por ejemplo el siguiente cuadro propuesto por Cisneros (2003):

Cuadro 3. 4 Parámetros de humedad según textura del suelo (Fuente: Cisneros 2003)

Textura del suelo	PMP (%)	CC (%)	Au (%)
Arena media	1,7	6,8	5,1
Arena fina	2,3	8,5	6,2
Franco arenoso	3,4	11,3	7,9
Franco arcilloso	10,2	21,5	11,3
Arcilla	14,7	22,6	7,9

3.7.3. Determinación de los coeficientes hídricos: capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

3.7.3.1. Método de platos de cerámica y ollas de presión

Para obtener los valores de CC y PMP se puede realizar el método de las ollas de presión. Esto consiste según Villalobos (2008), en que las muestras tomadas anteriormente (sin disturbar) mediante unos anillos y a las profundidades que se desean; se colocan en una bandeja de plástico hasta saturar. Luego se extraen y se colocan en la olla de presión, cerrándola en forma hermética. Luego con los reguladores de presión se aplica 0,33 atmósferas durante 48 horas para determinar el CC y se pesan, y para determinar el PMP se realiza exactamente lo mismo que para calcular el CC, solo que esta vez se le aplica a la olla una presión igual a 15 atmósferas; seguidamente después de sacar las muestras de la olla se meten al horno a 105° por 24 horas y se pesan para determinad la humedad gravimétrica a CC y PMP mediante la siguientes fórmulas:

$$CC = \left(\frac{Psh_{cc} - PSS}{PSS} \right) * 100 \dots \dots \dots (3.10)$$

$$PMP = \left(\frac{Psh_{PMP} - PSS}{PSS} \right) * 100 \dots \dots \dots (3.11)$$

Donde:

CC = humedad a capacidad de campo, %

PMP = humedad a punto de marchitez permanente, %

Psh_{cc} = peso de suelo húmedo en gramos a 0,33 atm

Psh_{PMP} = peso de suelo húmedo en gramos a 15 atm

Pss = peso de suelo seco en gramos

Así mismo, seguidamente, una manera de expresar el porcentaje de agua útil del suelo numéricamente, es mediante la siguiente expresión (Valverde 2007; Leitón 1985):

$$\%Au = CC - PMP \dots \dots \dots (3.12)$$

Donde:

%Au = porcentaje de agua útil o agua disponible

CC = humedad a capacidad de campo en %

PMP = humedad a punto de marchitez permanente en %

3.7.3.2. Método utilizando fórmulas empíricas

Para tener otras aproximaciones a los valores de los coeficientes hídricos del suelo, se pueden utilizar una serie de ecuaciones para encontrar los porcentajes de humedades a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, las cuales están basadas en los contenidos de arcilla, limo y arena, también según textura del suelo y en base a los mismos coeficientes hídricos.

Villalobos (2008) propone varias de estas fórmulas las cuales pueden ser utilizadas, sin embargo se aconseja ante todo, el realizar las pruebas de laboratorio y obtener estos valores mediante el método de ollas de presión. Las expresiones las cuales sirven para calcular CC y PMP se presentan a continuación:

- a) Para calcular CC se tiene:
- a) En base a contenido de arcilla, limo y arena:

$$CC = 0,6382 * \%arcilla + 0,2845 * \%limo + 0,0507 * \%arena \dots \dots \dots (3.13)$$

- b) También se encuentra la siguiente ecuación tomando en cuenta el valor de PMP obtenido de alguna manera anteriormente:

$$CC = 2,0421 * PMP - 2,3823 \dots \dots \dots (3.14)$$

- b) Para calcular PMP se puede utilizar:
- c) Tomando en cuenta el valor de CC se tiene:

$$PMP = 0,4897 * CC + 1,1666 \dots \dots \dots (3.15)$$

- d) Según textura se pueden utilizar las relaciones 3.16, 3.17,3.18, las cuales se muestran a continuación:

Para suelos arcillosos:

$$PMP = \frac{CC}{2} \dots \dots \dots (3.16)$$

Para suelos de textura media:

$$PMP = \frac{CC}{2,1} \dots \dots \dots (3.17)$$

Para suelos arenosos:

$$PMP = \frac{CC}{2,2} \dots \dots \dots (3.18)$$

3.8. Necesidades de riego

3.8.1. Lámina de agua

En una parcela de riego por superficie generalmente en cabecera se infiltra más agua que en cola, y el tiempo que debe durar el riego está en función de la cantidad de agua que requiera el cultivo y de la velocidad con que el suelo infiltra el agua. Si durante la ejecución de un riego se diera un corte al suelo, se podría observar la cantidad de agua infiltrada en cada punto de la parcela y cómo evoluciona el frente de humedecimiento (Fernández 2010; Booher 1974).

De la misma manera, si se mirara el perfil del suelo una vez concluido el riego se podría observar la “altura” de agua que se ha infiltrado a lo largo de la parcela, lo que se denomina como lámina de agua infiltrada.

Otra manera simple de entender este significado es, ver la lámina como una determinada cantidad de agua que se debe de aplicar al suelo para que satisfaga las necesidades del cultivo, es decir cuánta agua se debe de dejar en el suelo (Valverde 2007).

3.8.2. Lámina máxima

Es la lámina de riego de pre-siembra (Cisneros 2003), y es definida como aquella lámina que deberá de tener el suelo al momento de la siembra y la máxima humedad que puede retener el suelo, es decir, cuando está a capacidad de campo (Aidarov, *et al* 1985).

Conociendo los valores de capacidad de campo y punto de marchites permanente (descritos anteriormente) y añadido a estos, el valor de la profundidad del perfil de suelo a considerar más el peso específico aparente, a continuación mediante la siguiente fórmula se puede calcular la lámina máxima de agua que está retenida en el suelo.

Este valor también suele llamarse por otros autores como L_r , y es llamada lámina de retención máxima y se calcula mediante la siguiente ecuación (Cisneros 2003):

$$L_m = \frac{CC - PMP}{100} * P_e * prof \dots \dots \dots (3.19)$$

Donde:

L_m = lámina máxima (cm, mm, etc.)

CC = capacidad de campo (%)

PMP = punto de marchitez permanente (%)

P_e = peso específico aparente (g/cm^3)

Prof = profundidad del perfil a considerar (cm, mm, etc.)

3.8.3. Lámina neta a aplicar o Dosis neta (Lámina de riego)

Para efectos de cualquier diseño de riego que se requiera realizar, la lámina de agua que se toma en cuenta es la lámina neta (L_n); la cual se define como la dosis de agua que debe ser aplicada durante el riego con el fin de cubrir el agua que ha utilizado el cultivo durante la evapotranspiración y se dará cuando se haya consumido un determinado porcentaje de la capacidad de almacenamiento, es decir, antes de que el suelo llegue a P.M.P (Cisneros 2003).

Se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$L_n = L_m \cdot A_g \dots \dots \dots (3.20)$$

Donde:

L_n = lámina neta a aplicar en mm, cm, etc.

L_m = lámina máxima que retiene el suelo en mm, cm, etc.

A_g = es el agotamiento permisible (decimal)

3.8.3.1. Agotamiento permisible

Existe un intervalo de humedad entre la CC y el PMP a lo que anteriormente se le ha llamado agua útil, por lo tanto se pensaría que se debería de regar hasta que la humedad baje hasta el punto de marchitamiento pero esto no es viable ya que por desgracia para ese

momento, ya las plantas han sufrido daños irreversibles (Pascual 2008). Dentro de ese intervalo antes descrito, existe un nivel en el que las raíces encuentran mayor dificultad para extraer el agua y se produce una disminución en la transpiración, lo que suele traer consigo pérdidas de producción. Este se denomina Nivel de Agotamiento Permisible (NAP) y normalmente se representa como una fracción del intervalo de agua útil (Doorenbos y Kassam 1979).

Según experiencias recomiendan que se deba de regar cuando se ha consumido el 25-40% del agua útil en cultivos de raíces superficiales, es decir, de poca profundidad; del 40-50% en cultivos con raíces de profundidad intermedia como por ejemplo el maíz, y el 50% en cultivos con raíces profundas (Keller y Bliesner 1990). Grassi (1987), insiste para fines de diseño, en regar cuando se ha agotado el 50% del agua útil. Ollier y Poiree (1981), recomiendan regar antes de que se hayan agotado el 2/3 del agua útil.

Allen, *et al* 2006 también proponen una serie de valores de agotamiento permisible y que pueden ser de gran ayuda, y están expresados en el cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Agotamiento permisible para diferentes cultivos y rango de profundidad radicular efectiva máxima en metros en suelos sin restricciones al crecimiento de las raíces (Allen, *et al* 2006)

CULTIVO	Prof. raíces (m)	NAP %	CULTIVO	Prof. raíces (m)	NAP %
Alfalfa	1.0-2.0	55	Lino	1-1,5	50
Aguacate	0,5-1,0	70	Lúpulo	1-1,2	50
Ajo	0,3-0,5	30	Maiz	1-1,7	55
Alcachofa	0,6-0,9	45	Mandioca	0,5-0,8	35
Algodón	1,0-1,7	65	Manzana, cerezo, pera	1,0-2,0	50
Apio	0,3-0,5	20	Melocotón, Fruta hueso	1,0-2,0	50
Arroz	0,5-1,0	20	Melón	0,8-1,5	40
Banana	0,5-0,9	35	Melón (cantaloupe)	0,9-1,5	45
Batata	1-1,5	65	Menta	0,4-0,8	40
Berenjena	0,7-1,2	45	Nabo	0,5-1,0	50
Brocolí	0,4-0,6	45	Nogal	1,7-2,4	50
Cacahuete	0,5-1,0	50	Olivo 40-60% cobert.	1,2-1,7	65
Cacao	0,7-1,0	30	Palmas	0,7-1,1	65
Café	0,9-1,5	40	Patata	0,4-0,6	35
Calabaza	1,0-1,5	35	Pepino	0,7-1,2	50

3.8.4. Frecuencia y periodo de riego

3.8.4.1. Frecuencia de riego

La frecuencia de riego (Fr) se considera como una función del suelo y del cultivo ya que relaciona la evapotranspiración real o uso consuntivo (ETr) del mes más crítico y la lámina neta de riego (Valverde 2007), e indica cada cuanto se debe regar (Leiton 1985).

Ésta puede calcularse de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{Ln}{ETr} \dots \dots \dots (3.21)$$

Donde:

Fr = es la frecuencia de riego, en días

Ln = lámina neta expresada en mm

ETr = es la evapotranspiración real expresada en mm/día, cm/día, etc

En caso de que la Fr dé un valor con varias cifras significativas sin redondear por ejemplo, 10,60 o 10,12 días, se debe redondear su valor a 10 (siempre redondear al menor dígito) ya que si se redondea a un dígito mayor la lámina neta sería mayor a la permitida por el suelo. Su recalcu lo sería de la siguiente manera:

$$Ln_c = Fr * ETr \dots \dots \dots (3.22)$$

Donde:

Ln_c = lámina neta corregida, en mm, cm, etc.

Fr = es la frecuencia de riego, en días

ETr = es la evapotranspiración real expresada en mm/día, cm/día, etc

Seguidamente, con los valores de la lámina neta corregida (Ln_c) y el uso consuntivo mensual (ETr_m) se puede obtener fácilmente el valor del número de riegos que se debe de aplicar por mes, de la siguiente manera.

$$n = \frac{ETr_m}{Ln_c} \dots \dots \dots (3.23)$$

Donde:

n = número de riegos al mes

3.8.4.2. Tiempo de riego

Leitón (1985) lo define así como: “el tiempo en horas que debe de durar una aplicación de riego, para satisfacer la lámina neta de riego, a la profundidad deseada”. Y se calcula de la siguiente manera:

$$TR = \frac{Lb}{Ib} \dots \dots \dots (3.24)$$

Donde:

TR = es el tiempo de riego expresado en horas

Lb = es la lámina bruta expresada en mm o cm

Ib = es la infiltración básica, expresada en mm/h o cm/h

3.8.5. Lámina bruta o Dosis bruta de riego

3.8.5.1. Eficiencia global de riego

Se define como la relación entre el agua consumida por los cultivos en el sistema de riego y el agua derivada de la fuente natural hacia el sistema de riego (Israelsen, citado por Pascual 2008).

Este concepto pretende garantizar que el agua que se deriva desde la fuente de abastecimiento, sea la necesaria para satisfacer las necesidades del sistema de riego,

incluyendo las pérdidas desde su derivación y conducción hasta la parcela para el cálculo de las necesidades de riego (Valverde 2007). Es decir, que dentro de este factor están incluidas las pérdidas de agua más importante como lo son las pérdidas durante la conducción del agua en la red interna del sistema y en la aplicación del agua al suelo así como también las pérdidas en el almacenamiento del embalse o reservorio (Pascual 2008).

Keller & Mc Culloch hablan de eficiencias de riego superficial desde 20 hasta 75% según sean las condiciones del suelo y el sistema de riego que se use (Grassi 1988).

La importancia de este término radica en que las necesidades totales de riego (es decir lámina o dosis bruta de riego) se obtienen dividiendo las necesidades netas de riego (la lámina neta a aplicar o lámina de riego) por la eficiencia global de riego (Efr), obteniéndose así la siguiente relación matemática la cual desemboca en el resultado final de la lámina bruta requerida (Pascual 2008; Villalobos 2008; Valverde 2007; Cisneros 2003).

$$Lb = \frac{Ln}{Efr} \dots \dots \dots (3.25)$$

Donde:

Lb = lámina bruta de riego en mm, cm, etc.

Ln = lámina neta de riego en mm, cm, etc.

Efr = está expresado en valor decimal (Ejemplo: 65% se expresa = 0,65)

3.9. Evapotranspiración real

La evapotranspiración real se define como la cantidad de agua, expresada en mm/día, que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal (Allen, *et al* 2006; Israelsen y Hansen 1979).

Éste término hace referencia a otros dos no menos importantes los cuales son la evapotranspiración potencial (ET_o) y el coeficiente del cultivo (k_c); y se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$ETr = ETo * kc \dots \dots \dots (3.26)$$

Donde:

ETr = evapotranspiración real del cultivo en mm/día, mm/mes.

ETo = evapotranspiración potencial en mm/día, mm/mes

Kc= coeficiente del cultivo (adimensional)

3.9.1. Evapotranspiración potencial (ET_o)

La evapotranspiración potencial o del cultivo de referencia como también es llamada; se denomina como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas (Allen, *et al* 2006).

Existen ciertos métodos para calcular la evapotranspiración potencial como el del tanque evaporímetro y los métodos basados en datos climáticos, los cuales son métodos estadísticos; y se presentan a continuación:

Cuadro 3. 6 Métodos para obtener la evapotranspiración potencial según dato climático (Fuente: Cisneros 2003)

Dato Climático requerido	Autores
Radiación	Penman Makkink Jensen Haise
Temperatura	Blaney y Criddle Thornthwaite Turc Hargreaves-Samani
Humedad relativa	Hargreaves

Menciona Leitón (1985), que de los anteriores métodos basados en datos climáticos, el que proporciona información más apegada a la realidad, es el método de Penman (1948); pero

que debido a la necesidad de una gran cantidad de datos que son difícilmente suministrados por las estaciones meteorológicas de Costa Rica, hace que su uso sea un tanto limitado. Mientras que su contraparte sería el método de Hargreaves, el cual es mucho más simple que el anterior y no hay que tener mayor uso que el de las temperaturas del sitio donde esté ubicado el trabajo a realizar.

3.9.2. Coeficiente del cultivo (K_c)

Se expresa como la relación entre la E_{Tr} y la E_{To} y se determina experimentalmente, pero para mayor facilidad también se encuentran valores de K_c determinados por investigadores y comúnmente usados en la obtención de la E_{Tr} . Este valor no es constante durante las fases de desarrollo del cultivo.

Durante el período de crecimiento del cultivo existen diferentes fases, la variación del coeficiente del cultivo K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo (Allen, *et al* 2006). En base a Doorembos y Pruitt (1976) se pueden definir 4 fases:

- a) Inicial: desde la siembra hasta un 10 % de cobertura por el cultivo.
- b) Intermedio: se computa hasta que el cultivo cubre completamente el suelo hasta el máximo en forma ascendente
- c) Máximo: ocurre en el período de máxima demanda del cultivo alrededor de floración y resultan los valores más altos de coeficientes de cultivo.
- d) Final: en general es la etapa donde ya no se realizan riegos.

Leitón (1985), proporciona el siguiente cuadro (utilizados para el método de Blaney y Criddle), con algunos de los coeficientes de cultivo más utilizados en Costa Rica.

Cuadro 3.7 Coeficiente K_c para varios cultivos

Mes	Sorgo	Arroz	Maiz	Frijol	Pastos	Caña
Nov.					0.63	0.61
Dic.	0.39	0.54	0.26	0.26	0.66	0.64
Ene.	0.79	1.07	0.68	0.60	0.72	0.70
Feb.	0.76	1.06	0.85	0.66	0.74	0.77
Mar.	0.35	0.77	0.74	0.38	0.76	0.79
Abr.			0.80		0.78	0.84
May.			0.37		0.77	0.83

Palacios (1999), ha propuesto unos coeficientes de desarrollo K_c para algunos cultivos, según desarrollo o según ciclo vegetativo. Ver Anexos, Anexo 1 y Anexo 2. También se suelen usar otros valores, como por ejemplo los valores sugeridos por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración por el método de Penman, modificado por la FAO (Allen, *et al* 2006).

3.9.3. Cálculo de la evapotranspiración potencial: Método de Hargreaves

La fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani 1985) es de muy fácil uso ya que solamente requiere de datos de temperatura y de radiación solar extraterrestre, la cual se encuentra tabulada. La expresión viene dada de la siguiente manera:

$$ET_o = 0,0023(t_{med} + 17,78) * R_o * (t_{max} - t_{min})^{0,5} \dots \dots \dots (3.27)$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración potencial diaria, mm/día

t_{med} = temperatura media diaria en °C

R_o = Radiación solar extraterrestre, en mm/día (Datos tabulados. Ver Anexo: Anexo 3)

t_{max} = temperatura diaria máxima en °C

t_{min} = temperatura diaria mínima en °C

Luego de obtener la ET_o se debe de elegir un coeficiente de cultivo K_c , el cual para cada método existen sus respectivos coeficientes. Para el método de Hargreaves se proponen

los siguientes coeficientes de cultivo Kc propuestos por Avidan (1994), citado por Villalobos (2008):

Cuadro 3. 8 Algunos de los coeficientes Kc para la ecuación de Hargreaves

Cultivo	Fase inicial	Fase media	Fase final
Asfalfa	0,40-0,50	1,00-1,40	0,95-1,35
Arroz	1,10,1,15	1,10-1,30	1,10
Caña	0,40-0,50	1,00-1,30	0,50-0,60
Cítricos	0,65	0,65-0,75	0,65
Lechuga	0,20-0,30	0,85-1,05	0,45
Maíz de grano	0,20-0,50	1,05-1,20	0,35-0,60
Papa	0,40-0,55	1,10-1,20	0,40-0,75

3.10. Caudal requerido

Es la cantidad o volumen de agua que se necesita, para satisfacer la lámina bruta de riego. Y se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q = \frac{Lb * A}{TR * 60} \dots \dots \dots (3.28)$$

Donde:

Q = caudal requerido, en litros/segundo (l/s)

Lb = es la lámina bruta expresada en mm/ha

TR = es el tiempo de riego expresado en minutos

A = área total a regar, en m²

3.11. Precipitación efectiva y Déficit de agua.

Estos son dos términos comúnmente utilizados cuando se habla del calendario de riego, aunque también se les pueden dar muchos otros usos.

Primero que todo el calendario de riego se define como: *“aquel programa que nos da información acerca del número de riegos, intervalos, láminas de reposición y láminas netas.*

Se debe hacer énfasis que los programas de riego para cada cultivo deben variar de acuerdo a las condiciones prevaletientes de clima y suelo”. (Doorenbos y Pruitt 1976).

Para la determinación del calendario de riego se puede realizar por dos tipos de métodos:

- a) Método gráfico
- b) Método analítico

Para aplicar estos métodos se debe de realizar un análisis o balance hídrico con el que se determinarán los meses de mayor demanda de agua, según la evapotranspiración real mensual y la precipitación efectiva. La metodología descrita por Villalobos (2008) y Doorenbos y Pruitt (1976) para obtener el calendario de riego, se basa primeramente en obtener la evapotranspiración del cultivo para todo su ciclo, y luego sabiendo la precipitación efectiva, obtener cuándo se producen los déficits de agua; lo que conlleva a realizar una serie de cálculos que terminarán en la realización de una gráfica útil para programar los riegos.

Para este trabajo se elegirá la evapotranspiración de diseño basado en cuándo se da el momento de mayor demanda de agua. Para ello a continuación en los puntos 3.11.1 y 3.11.2 se muestran los dos parámetros que deben de ser claramente definidos.

Según se muestran en el libro Fundamentos de riego de Villalobos (2008), se deben de hacer los siguientes cálculos para calcular el déficit mensual:

3.11.1. Evapotranspiración real del cultivo (E_{tr}) para todo su ciclo:

Se puede calcular según las diferentes fases de desarrollo del cultivo, o a intervalos constantes o cada 15 días o mensualmente.

3.11.2. Precipitación efectiva (PD):

Según la universidad boliviana la Universidad Mayor de San Simón (UMSS) la precipitación efectiva es: *“aquella fracción de la precipitación que puede ser aprovechada por las plantas, las otras partes del agua se pierden por escurrimiento, percolación*

profunda o por evaporación de la lluvia interceptada por las hojas. En zonas con lluvias intensas y frecuentes solo una fracción relativamente baja de la precipitación queda almacenada en la rizósfera, y un porcentaje mayor de intercepción por cubierta foliar, de donde el agua será posteriormente evaporada; así, lluvias diarias de 6 a 8 mm pueden perderse en su totalidad.” (UMSS 1999)

Para calcular este valor se pueden utilizar distintos métodos, de los cuales 2 se muestran a continuación.

Como primera aproximación, Brouwer y Heibloem (1985) proponen las siguientes fórmulas para su aplicación en áreas con pendientes inferiores al 5 %. Así en función de la precipitación caída durante el mes tenemos:

$$PE = 0,8 * P - 25 , si P > 75 mm/mes \dots \dots \dots (3.29)$$

$$PE = 0,6 * P - 10, si P < 75 mm/mes \dots \dots \dots (3.30)$$

Donde:

P = precipitación mensual (mm/mes)

PE = precipitación efectiva (mm/mes)

También se ha elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos del Ministerio de Agricultura de Estados Unidos, una ecuación para obtener los valores de la precipitación efectiva mensual (mm), con el único inconveniente de que esta ecuación incluye la lámina de riego neta y la evapotranspiración media mensual. De esta manera se tiene la siguiente expresión:

$$PE = (1,25247 * P^{0,82416} - 2,93522) * 10^{0,00095U} * f \dots \dots \dots (3.31)$$

Donde:

PE = precipitación efectiva mensual (mm)

P = precipitación mensual (mm)

U = evapotranspiración real media mensual

$f = 0,531747 + 0,011621 * \Delta s - 8,9 * 10^{-5} * \Delta s^2 + 23 * 10^{-7} * \Delta s^3$ siendo Δs = lámina de riego neta (mm)

Finalmente para el cálculo del déficit para cada período en que se dividió el cultivo (Df) se obtiene mediante la siguiente fórmula.

$$Df = PE - ETr \dots \dots \dots (3.32)$$

Donde:

Df = déficit para cada período (mm)

Pe = precipitación efectiva (mm)

ETr = evapotranspiración real (mm)

3.12. Métodos de Riego superficial

Método o sistema de riego, se define como: *“El conjunto de instalaciones técnicas que garantizan la organización y realización del mejoramiento de tierras mediante el riego.”* (Aidarov, et al 1985).

Cisneros (2003) establece que el riego superficial es el tipo de riego que se da a través de estructuras establecidas en la parcela como son surcos, melgas, camas meloneras (melón, sandía, papaya, calabaza), cuadros, surcos alternos. Las estructuras que se explicarán ampliamente en este trabajo serán los surcos, melgas y cuadros.

3.12.1. Riego por surcos

Este método se realiza de la siguiente haciendo correr agua en pequeños canales llamados surcos que llevan el agua a medida que desciende por la pendiente del campo o a través del mismo. El agua se infiltra en el fondo y lados de los surcos, proporcionando la humedad deseada en el suelo (Booher 1974). Un ejemplo de riego por surcos se puede observar en la siguiente figura.



Figura 3. 4 Ejemplo de un sistema de riego por surcos

Cisneros (2003) recomienda para este método cualquier tipo de suelos, a excepción de arenas donde el agua se infiltra sumamente rápido, ya que la distribución de agua lateralmente sería muy deficiente. Los suelos de textura media y moderadamente fina son en los que más se adapta éste tipo de método ya que poseen una elevada capacidad de retención del agua; mientras que en suelos arcillosos requieren, para una determinada lámina neta, aplicar caudales pequeños durante largos períodos (Pascual 2008).

Con respecto a la pendiente de los surcos en la dirección del movimiento del agua, Booher (1974) dice que la pendiente no debe de exceder el 2 %, mientras que Cisneros (2003) recomienda pendientes menores de 1%, y de hasta 3% en caso de que no se presenten precipitaciones intensas. Sin embargo, cuando se habla de surcos en contorno, los terrenos idóneos para este método, no deben de tener pendientes superiores de 8 – 10% (Villalobos 2008).

En riego por surcos se presentan los siguientes valores de eficiencias dados en el cuadro 3.9.

Cuadro 3. 9 Eficiencias de riego recomendadas para surcos. (Fuente: Cisneros 2003)

Pendiente (%)	Eficiencia en surcos (%)
0,0-0,5	70
0,5-1,0	65*
1,0-2,0	55

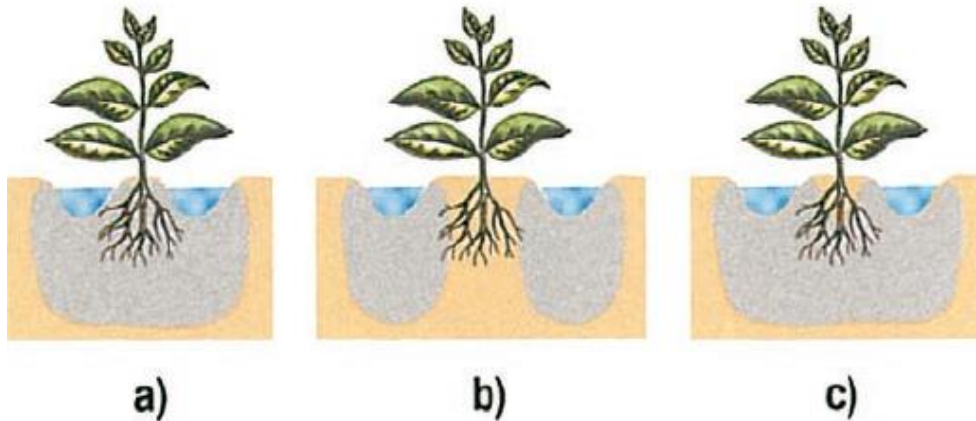
*Úsese para surcos en contorno

En los sistemas de riego surcos, los cultivos utilizados no deben de tener la característica de tener una cierta resistencia al agua como en riego por melgas, por esto tenemos que:

“El riego por surcos es agronómicamente muy aconsejable para algunos cultivos que son muy sensibles al encharcamiento, ya que al sembrarse sobre la parte superior del surco se evita mojar el cuello de la planta y el sistema radicular nunca se cubre por completo de agua, por lo que se garantiza su aireación aun durante riegos de elevada duración. También es un sistema indicado para suelos de mala estructura en los que el contacto con el agua de riego produce costras que inducen compactación y reducen el intercambio gaseoso del suelo.” (Faci y Playán 1996:19).

Otro aspecto de suma importancia a la hora de realizar un diseño de riego por surcos, es la separación que debe de haber entre cada surco, ya que ésta debe ser tal que quede asegurado el mojado de todo el suelo ocupado por las raíces. El movimiento del agua en el suelo depende, sobre todo, de la textura. En suelos arcillosos el agua se expande lateralmente con mayor facilidad que en los arenosos, en los que el agua tiende a desplazarse en forma vertical, por lo que los surcos pueden estar más separados en el primer caso. Las pérdidas de agua que se producen en suelos arenosos pueden condicionar la utilización de surcos en este tipo de suelos. En ocasiones puede haber dificultades a la hora de acomodar la separación de los surcos a la textura del suelo, ya que es necesario tener en cuenta el marco requerido por el cultivo y la maquinaria a utilizar en otras operaciones (Fernández 2010).

En la siguiente figura se ejemplifica de mejor manera, por qué se debe de tener mucho cuidado con la separación que debe de haber entre cada surco:



Separación entre surcos. a) Poca separación. b) Mucha separación. c) Separación adecuada.

Figura 3. 5 Separación entre surcos (Fernández 2010)

Mediante investigaciones realizadas por Grassi, se ha determinado que la separación conveniente entre surcos, para suelos franco – limosos, se puede calcular mediante la siguiente expresión (Pascual 2008; Villalobos 2008):

$$W = 1,73 * D \dots \dots \dots (3.33)$$

Donde:

W = separación entre surcos, en metros.

D = profundidad de las raíces del cultivo, en metros.

Holzapfel, citado por Villalobos (2008), menciona la siguiente fórmula, la cual es mucho más general que la anterior y aplica para diferentes tipos de suelo según su textura:

$$W = Ks * D \dots \dots \dots (3.34)$$

Donde:

K_s = es 2,5 para suelos arcillosos; 1,5 para francos y 0,5 para arenas finas.

D = profundidad de las raíces del cultivo, en metros.

3.12.1.1. Diseño de riego por surcos

De acuerdo a Villalobos (2008), se puede seguir el siguiente procedimiento para un diseño de riego por surcos el cual está basado en cuadros. La metodología de este diseño está adaptada para cuando no se cuenta con las pruebas de infiltración en surcos.

Pueden encontrarse otras metodologías similares de diseño en: Pascual (2008), Cisneros (2003), Booher (1974).

3.12.1.1.1. Secuencia de cálculo

Para realizar un diseño de riego por surcos, se deben de calcular una serie de datos los cuales serán explicados a continuación. El método está dado por los siguientes pasos:

a) Orientación de los surcos

La orientación de los surcos deberá ser en sentido de la mayor pendiente, sin que rebase los límites que se marcan para el diseño, por esto mismo se debe de calcular tanto la pendiente longitudinal como transversal.

Así mismo, se tienen las siguientes expresiones para el cálculo de las pendientes:

$$SEO = \frac{N1 - N2}{D_{N1-N2}} * 100 \dots \dots \dots (3.35)$$

$$SNS = \frac{N1 - N2}{D_{N1-N2}} * 100 \dots \dots \dots (3.36)$$

Donde:

SEO = es la pendiente en %, de dirección este - oeste.

SNS = es la pendiente en %, de dirección norte – sur

b) Cálculo de la separación entre surcos.

Como es un parámetro que está en función de la textura del suelo y la profundidad de las raíces del cultivo, éste se puede calcular mediante las ecuaciones 3.33 y 3.34.

c) Cálculo de la frecuencia de riego (Fr)

Al haber calculado con anterioridad la lámina neta a aplicar y la evapotranspiración real se tiene como dato; simplemente se substituyen estos valores en la ecuación 3.21, para obtener el la frecuencia de riego en días, y luego de obtener esta, se debe de recalculer la lámina neta por medio de la ecuación 3.22.

d) Cálculo de la lámina bruta de riego (Lb)

Habiéndose calculado la lámina neta con anterioridad, se procede a determinar la lámina bruta. La lámina bruta se calcula mediante la ecuación 3.25. Para el cálculo de la lámina bruta se utiliza para la eficiencia de riego, alguna de las dadas en el cuadro 3.9.

e) Longitud de los surcos (Ls)

Se obtiene mediante el anexo 4, entrando al cuadro con la textura del suelo, la lámina bruta de riego y la pendiente. Se debe de tomar en cuenta, que la longitud del surco estará también definida según sea la longitud disponible en el terreno.

f) Caudal máximo no erosivo (Qmáx)

Se le denomina caudal máximo no erosivo, al caudal que se aplicará en la primera etapa de riego. Se dice que en un diseño de riego por surcos, lo que se busca al principio, es alcanzar lo más rápido posible el extremo del surco por medio del caudal máximo no erosivo y luego reducir el caudal a un valor que satisfaga la velocidad de infiltración del suelo.

Se hace de la anterior manera debido a que: *“con esto se busca evitar las pérdidas por escurrimiento al final del surco así como las pérdidas por percolación profunda.”* (Villalobos 2008)

A continuación, se muestran las ecuaciones experimentales (3.37, 3.38 y 3.40) que pueden ayudar a calcular el caudal máximo no erosivo.

Método de Criddle

Criddle et al (1965), citado por Grassi (1987), propone la siguiente ecuación para calcular el caudal máximo no erosivo:

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{38}{S} \dots \dots \dots (3.37)$$

Donde:

$Q_{m\acute{a}x}$ = caudal máximo no erosivo en L/min

S = pendiente del surco, en %

Método del SCS

Según el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Villalobos 2008), el caudal máximo no erosivo también se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{m\acute{a}x} = 3055,6 * A \dots \dots \dots (3.38)$$

Donde:

$Q_{m\acute{a}x}$ = caudal máximo no erosivo en L/min

A = área de la sección del surco en m²

Para encontrar el área hidráulica del surco, se puede tomar en cuenta que el surco es de forma parabólica; ya que luego del primer riego ésta es la forma que toma un surco generalmente (Villalobos 2008), por lo tanto se propone la siguiente ecuación la cual determina el área hidráulica de una parábola (Chow 1994:21):

$$A = \frac{2}{3} * T * y \dots \dots \dots (3.39)$$

Donde:

A = área hidráulica en m²

y = tirante (altura) de agua en m

T = espejo de agua en m

Método de Gardner

Para Gardner, citado por Villalobos (2008), el caudal máximo no erosivo se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{máx}} = 60 * \frac{C}{S^a} \dots \dots \dots (3.40)$$

Donde:

Q_{máx} = caudal máximo no erosivo en L/min

S = pendiente del surco, en %

C y a = coeficientes que dependen del tipo de suelo

Los valores de los coeficientes “C y a” se dan en el cuadro 3.10.

Cuadro 3. 10 Valores de C y a según el tipo de suelo

Textura	C	a
Muy fina	0,892	0,937
Fina	0,998	0,55
Media	0,613	0,733
Gruesa	0,644	0,704
Muy gruesa	0,665	0,548

Método en base a cuadro

También de acuerdo al Anexo 3 se puede calcular el caudal en función de la pendiente con que se van a diseñar los surcos.

g) Cálculo del caudal de infiltración (Q_{inf})

Se llama caudal de infiltración al caudal por aplicar en la segunda etapa de riego. El cual se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{inf} = 0,167V_{ip} * W * L \dots \dots (3.41)$$

Donde:

Q_{inf} = caudal de infiltración en L/min

V_{ip} = velocidad de infiltración promedio en cm/h

W y L = ancho y largo del surcos respectivamente, en m

La velocidad de infiltración promedio se encuentra mediante la ecuación 3.9. Aunque si de alguna manera se dispone de valores de infiltración, éstos se pueden obtener por medio del siguiente cuadro basándose en la textura del suelo:

Cuadro 3. 11 Valores de infiltración y clasificación según textura del suelo (Cisneros 2003)

Clasificación	Infiltración (cm/hr)	Textura
Muy lenta	<0,25	Suelos arcillosos con un alto contenido de arcilla
Lenta	0,25-1,75	Suelos arcillosos y franco arcillosos bajos en materia orgánica
Media	1,75-2,50	Suelos franco arenosos o franco limosos
Rápida	>2,50	Suelos arenosos o franco limosos profundos y de buena agregación

También se puede utilizar el siguiente cuadro proporcionado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, citado por Villalobos (2008):

Cuadro 3. 12 Infiltración básica en l.p.s/100 m de surco (Fuente: Villalobos 2008)

S (%)	Textura del suelo					
	Fina	Mod.Fina	Media	Mod.Gruesa	Gruesa	Muy Gruesa
0,00-0,25	0,170-0,373	0,237-0,543	0,373-0,813	0,542-1,288	0,814-1,899	>1,356
0,25-0,50	0,136-0,305	0,203-0,441	0,305-0,678	0,475-1,017	0,678-1,560	>1,153
0,50-1,00	0,136-0,271	0,203-0,407	0,271-0,542	0,407-0,949	0,610-1,356	>1,017
1,00-2,00	0,102-0,237	0,136-0,339	0,237-0,475	0,339-0,814	0,542-1,153	>0,882
2,00-4,00	0,068-0,203	0,130-0,271	0,203-0,407	0,271-0,678	0,407-0,949	>0,678

Si la infiltración que se usará será alguna de las propuestas en el cuadro 3.12, entonces se debe de hacer la siguiente operación matemática para convertir la infiltración básica (Ib) de l.p.s/100 m a mm/h ó cm/h:

$$Ib \left(\frac{cm}{h} \right) = \frac{Ib * 360}{E} \dots \dots \dots (3.42)$$

Donde E es el espaciamiento entre surcos en metros.

Teniendo la infiltración básica, para obtener la infiltración promedio del suelo simplemente se multiplica por cualquiera de los siguientes factores según la textura del suelo que se tenga, propuesto en el cuadro 3.13:

Cuadro 3. 13 Factor f según textura del suelo (Fuente: Villalobos 2008)

Textura del suelo	Factor f
De fina a moderadamente fina	1,50
De media a moderadamente gruesa	1,33
De gruesa a muy gruesa	1,20

También, otra manera de calcular el caudal de infiltración, es suponerlo como la mitad del valor del caudal máximo no erosivo, es decir:

$$Q_{inf} = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{2} \dots \dots \dots (3.43)$$

Donde $Q_{m\acute{a}x}$ es el caudal máximo no erosivo y Q_{inf} el caudal de infiltración.

Tanto el caudal máximo no erosivo como el caudal de infiltración deben de determinarse por medio de pruebas de campo en surcos; pero en caso de que no se puedan realizar estas pruebas se pueden utilizar los calculados por los procedimientos de los puntos (f) y (g) explicados anteriormente.

El diseño de un sistema de surcos con pruebas de campo se puede detallar en Villalobos (2008).

h) Cálculo del tiempo de infiltración (T_i)

Éste es el tiempo que se requiere para infiltrar la lámina requerida en el suelo. Este tiempo también será el tiempo que debe durar el riego con el caudal de infiltración. Para su cálculo se toma la lámina bruta ya que se debe de tomar en cuenta la eficiencia de riego.

Mediante la siguiente fórmula se puede encontrar el tiempo de infiltración:

$$T_i = \frac{L_b}{V_{ip}} \dots \dots \dots (3.44)$$

Donde:

T_i = tiempo de infiltración en horas

L_b = lámina bruta de riego en cm ó mm

V_{ip} = velocidad de infiltración promedio en cm/h ó mm/h

i) Cálculo del tiempo de avance (T_a)

En simples términos, se denomina tiempo de avance al tiempo en que se debe de aplicar el caudal máximo no erosivo correspondiente a la primera etapa, y es el tiempo

necesario para que el caudal máximo no erosivo llegue al final del surco. Este está expresado de la siguiente manera:

$$Ta = \frac{Ti}{4} \dots \dots \dots (3.45)$$

Donde:

Ta = tiempo de avance en horas

Ti = tiempo de infiltración en horas

Se asume la anterior relación ya que se establece que para la cuarta parte del tiempo de infiltración se produce una percolación profunda de 5,6%, partiendo del hecho de que conforme aumenta el tiempo de avance las pérdidas por percolación profunda serán mayores, esto debido a que el agua está en más tiempo en contacto con el suelo, cerca de la cabecera del surco (Villalobos 2008). Por lo tanto, esta relación hace que las pérdidas no sobrepasen el valor fijado anteriormente y se considera como un valor de diseño.

j) Tiempo total de riego (Tt)

Como anteriormente se ha dicho, el tiempo de riego debe ser suficiente para cubrir la lámina neta a aplicar que se necesita en el suelo, por lo tanto, para este caso en específico, comprende lo que es el tiempo de infiltración y el tiempo de avance, y se determina como una suma de los dos tiempo, representado de la siguiente manera:

$$Tt = Ti + Ta = Ti + \frac{Ti}{4} \dots \dots \dots (3.46)$$

Donde:

Tt = tiempo total del riego en el surco

k) Surcos regados a la vez en la primera etapa (N)

Corresponde a la relación entre el caudal disponible de nuestra fuente de agua, y el caudal máximo no erosivo. Y viene dado de la siguiente manera:

$$N = \frac{Q_{fuente} * E_{fc}}{Q_{m\acute{a}x}} \dots \dots \dots (3.47)$$

Donde:

N = surcos regados a la vez, en la primera etapa

Qfuente = caudal disponible

Qmáx = caudal máximo no erosivo

Efc = eficiencia de conducción

Según un estudio de un gran número de proyectos realizados en Estados Unidos (LLorca 1982), se tienen las siguientes eficiencias:

Para sectores de explotación menores de 20 ha:

- Efc = 0,8 en canales sin revestir
- Efc = 0,9 en tuberías o canales revestidos

Se debe de recordar, que luego de aplicarle el caudal máximo no erosivo al número de surcos que se permita durante un tiempo de aplicación el cual será el tiempo de avance; se tiene que regar seguidamente el mismo número de surcos con el caudal de infiltración durante un tiempo igual al tiempo de infiltración obtenido con anterioridad.

l) Número de surcos en toda el área (Nt)

Se puede obtener dividiendo el ancho del terreno entre la separación de los surcos y multiplicar el valor resultante por el número de las secciones en que se dividió el campo.

m) Tiempo para regar toda el área ($T_{100\%}$)

El tiempo para regar toda el área puede obtenerse mediante la siguiente relación:

$$T_{100\%} = \frac{Nt * Tt}{N * Hd} \dots \dots \dots (3.48)$$

Donde:

$T_{100\%}$ = tiempo para regar toda el área en días

Nt = número de surcos en toda el área

N = número de surcos regados a la vez en la primera etapa

Tt = tiempo total de riego en horas

Hd = horas disponibles para regar

3.12.2. Riego por melgas

Cuando se habla de riego por melgas, se pueden encontrar diversos nombres como por ejemplo: riego por tablares, escorrentía por tablares, por bandas, por amelgas, por fajas (Pascual 2008).

Este método utiliza diques paralelos que guían una lámina de agua en movimiento a medida que desciende por la pendiente. El terreno entre dos diques se llama tablar, banda o faja (Booher 1974). Suelen realizarse acequias de abastecimiento en el extremo superior de las fajas y canales de desagüe en el extremo inferior.

El comportamiento del agua sobre la melga es tal que el agua discurre a lo largo de las melgas formando una lámina delgada que se va infiltrando poco a poco al tiempo que avanza (Fernández 2010).

La longitud y ancho de las melgas van a depender básicamente de la pendiente con que se vaya a diseñar el sistema y conforme ésta sea mayor, menores serán sus dimensiones. A continuación se muestra un ejemplo de riego por melgas.

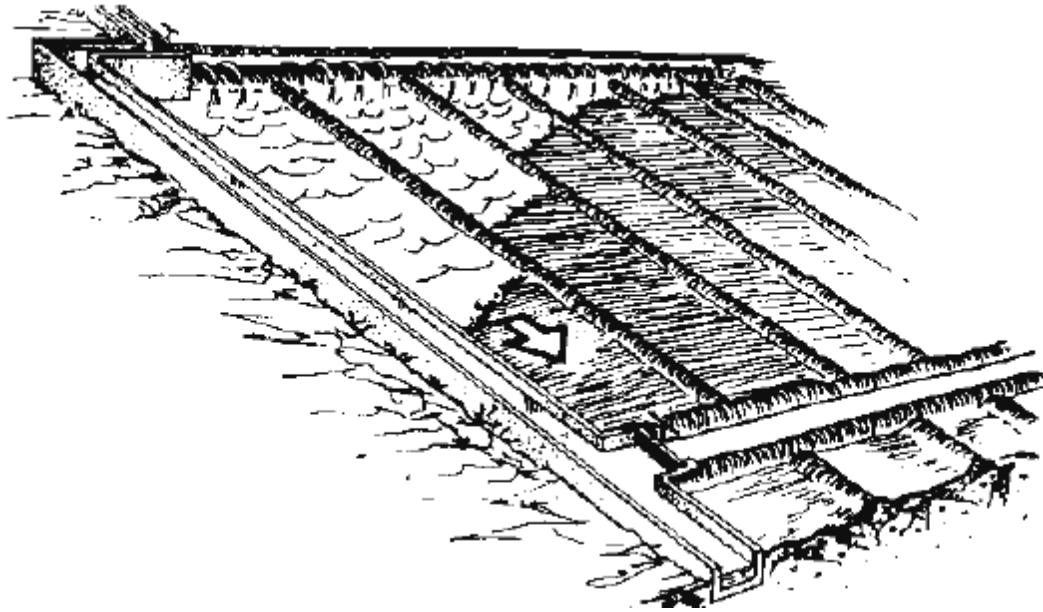


Figura 3. 6 Representación de riego por melgas (Fuente: Cisneros 2003)

Este tipo de riego es utilizado en frutales y en cultivos tupidos tales como alfalfa, cereales sembrados al voleo y pastos. En el caso del arroz sólo cuando existen caudales grandes. Para otros cultivos no es recomendado por el gran gasto de agua que manejan (Cisneros 2003; Pascual 2008).

Con respecto al suelo, las plantas de raíces poco profundas como los cereales y pastos pueden regarse eficazmente por este método en suelos lentamente permeables, como es el caso de los arcillosos; mientras que en suelos profundos y de textura media, son ideales para plantas de raíces profundas, como la alfalfa (Booher 1974). Se adaptan de excelente manera, en donde los suelos presentan una infiltración básica (I_b) menor de 1.6 cm/hr (Cisneros 2003). No se aconseja para suelos de textura de arena gruesa.

Se recomienda totalmente para terrenos con pendiente de 0.40 m por cada 100 m de largo ($S = 0.4\%$) (Cisneros 2003), sin embargo Pascual (2008) dice que en casos extremos

pueden utilizarse pendientes de hasta 2% en cultivos que no forman una densa masa entre la vegetación y el suelo (no encespedantes), y hasta el 4% en cultivos que estén bien establecidos y que sí forman una densa masa (encespedantes).

3.12.2.1. Diseño de un sistema de riego por melgas

Existen distintos métodos de diseño para las melgas, sin embargo para este caso se presentará la metodología dada por Villalobos (2005), la cual se basa en cuadros y gráficas, para melgas con pendiente y sin pruebas de campo en melgas.

Otros métodos para el diseño de sistemas de riego por melgas, basados en fórmulas empíricas y similares a este método, pueden ser encontrados en varias obras como: Fuentes (1988), Cisneros (2003), Pascual (2008).

3.12.2.1.1. Secuencia de cálculo

A continuación se presenta un formato para realizar el diseño de un sistema de riego por melgas facilitado por Villalobos (2005), y también se describe el procedimiento de cálculo para obtener cada uno de los valores requeridos para su diseño. Los pasos a seguir se dan a continuación:

a) Cálculo de la lámina de riego (L_n)

Se obtiene la lámina neta según la ecuación 3.22. Cuando la profundidad efectiva de raíces abarca varios perfiles del suelo, se debe de calcular la lámina neta por separado hasta donde llegue la profundidad efectiva y luego sumar las láminas.

b) Cálculo de la lámina bruta (L_b)

Para el cálculo de la lámina bruta de riego, primeramente se debe de obtener la eficiencia de riego, y para esto mediante el cuadro 3.14 a continuación, tomando en cuenta la infiltración base y la pendiente, puede ser determinada. Luego de obtener la eficiencia de riego se hace uso de la ecuación 3.25 para calcular la lámina bruta.

Cuadro 3. 14 Eficiencias recomendadas para el diseño de riego por melgas (Fuente: Cisneros 2003)

Pendiente (%)	Infiltración básica (cm/hr)			
	Menor a 0.76	0.76 - 1.27	1.52 - 5.08	5.08 - 10.16
0.00 - 0.05	75	75	70	60
0.05 - 0.50	70	70	75	70
0.50 - 1.00	65	70	70	70
1.00 - 2.00	60	65	70	75
2.00 - 4.00	55	60	65	60
4.00 - 6.00	50	55	60	55

c) Determinación del sentido de riego

Las melgas se trazarán en el sentido de la máxima pendiente. De acuerdo al sentido de la pendiente y el lugar de entrada de agua se resta del valor de la cota de la curva de nivel en el punto más alto de la melga (N1) el valor de la cota del extremo inferior (N2), midiendo la distancia (D_{N1-N2}) entre los dos puntos en forma paralela a la dirección de las melgas. La pendiente (S) será igual:

$$S = \frac{N1 - N2}{D_{N1-N2}} * 100 \dots \dots \dots (3.49)$$

Donde:

S = pendiente (%)

d) Cálculo del ancho de la melga (W)

Para determinar el valor del ancho de la melga, se puede utilizar el cuadro 3.15 a continuación. En el cual se recomiendan anchos mínimos y máximos para melgas, según la pendiente (S) calculada anteriormente.

Cuadro 3. 15 Anchos recomendados para melgas (Fuente: Villalobos 2005)

Pendiente (%)	Ancho (m)			Pendiente (%)	Ancho (m)		
	Mínimo	Medio	Máximo		Mínimo	Medio	Máximo
0,2	35	45	55	1	15	20	25
0,3	30	37	45	1,2	10	17	20
0,4	25	32	40	1,5	10	13	20
0,5	20	28	35	2	5	10	15
0,6	20	25	30	3	5	7	10
0,8	15	22	30	4	3	5	8

También puede estimarse el ancho así como el caudal por melga y largo máximo aceptable por medio del siguiente cuadro 3.16, a continuación:

Cuadro 3. 16 Normas generales para el diseño de riego superficial por melgas (Fuente: Cisneros 2003)

Velocidad de infiltración y textura del suelo	Caudal por melga (lps)	Ancho (m)	Longitud máxima (m)
(Mayor de 4 cm/h) Textura gruesa (arenoso)	70	3 -6	50 -100
(2-4 cm/h) Textura gruesa (franco limoso)	40-70	6 -10	100 -130
(1,5-2,0 cm/h) Textura media	28 -56	6-15	130 -200
(0,8-1,5 cm/hr) Textura fina (franco arcilloso)	14 -30	6-20	200 - 300
(Menos de 0,8 cm/hr) Textura muy fina (arcilloso)	14-30	6-20	200 -600

e) Cálculo del caudal (Q) por aplicar

Este es el caudal que ha de aplicarse a cada melga.

El caudal por aplicar en L/s se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{q_{or} * W * Lme}{100} \dots \dots \dots (3.50)$$

Donde:

Q = es el caudal por aplicar a la melga (L/s)

W = ancho de la melga (m)

Lme = longitud de la melga (m)

q_{or} = es el caudal unitario real en L/s x 100 m² de melga

Pero antes y para poder calcular su valor se deben de determinar los siguientes parámetros:

Cálculo del caudal unitario real (q_{or})

Para calcular el caudal unitario real se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$q_{or} = q_o * F \dots \dots \dots (3.51)$$

Donde:

q_{or} = caudal unitario real (L/s x 100 m² de melga)

q_o = es el caudal unitario en L/s x 100 m² de melga para una pendiente de 0,5%. Y se calcula mediante el nomograma de la figura 3.7. Para hacer uso de este nomograma, se entra al eje de las abscisas (eje horizontal) con el valor de la lámina bruta en milímetros y seguidamente se intercepta la recta diagonal que corresponde a la infiltración básica del suelo y seguidamente se traza una recta horizontal hacia el eje de las ordenadas (eje vertical) y se lee el valor del caudal unitario.

F = factor de corrección por pendiente.

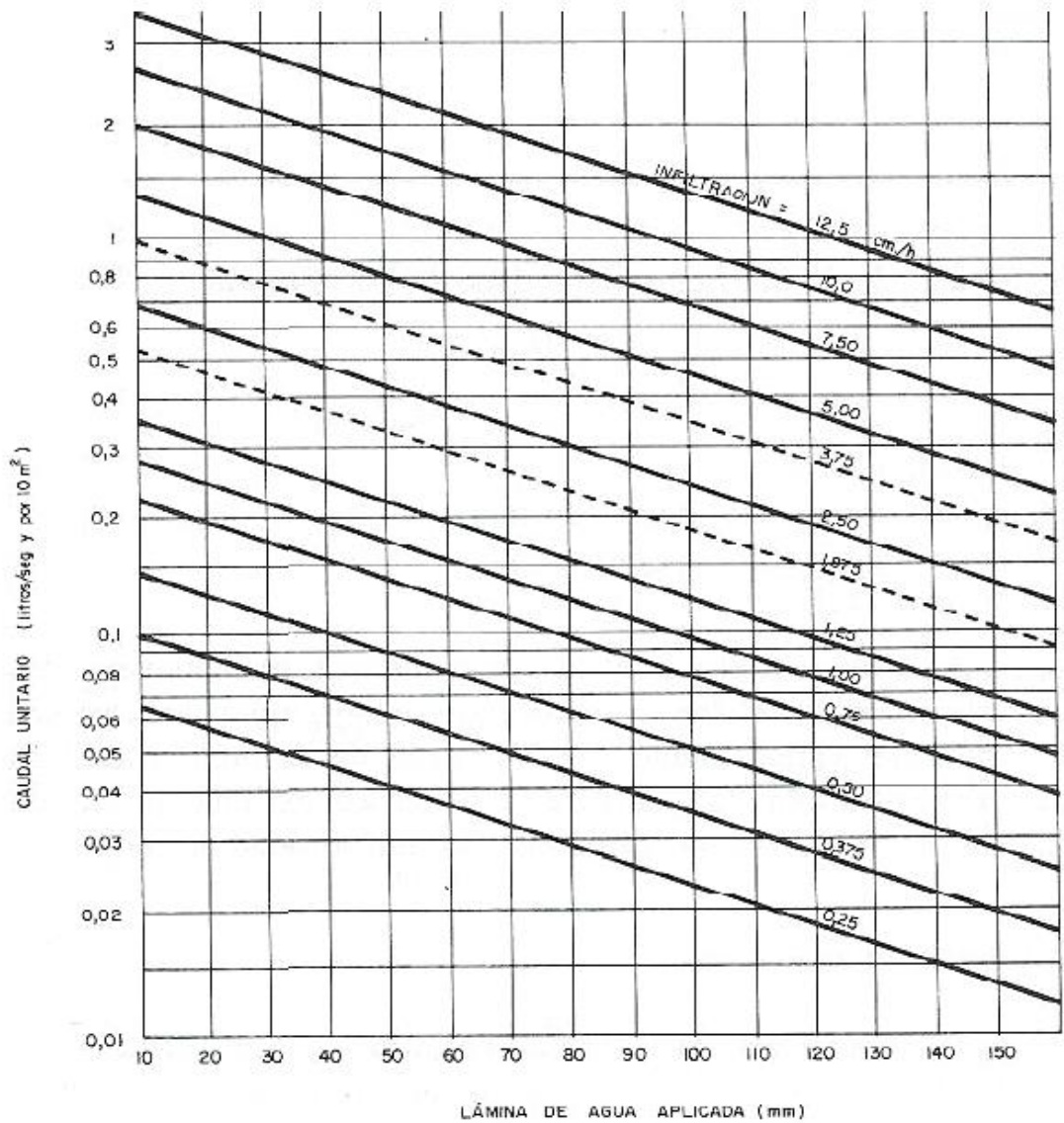


Figura 3.7 Caudal unitario en melgas (Fuente: Cisneros 2003)

– **Factor de corrección por pendiente (F)**

Si la pendiente es 0,5%, entonces $F = 1$, de lo contrario se tiene que aplicar la siguiente ecuación para encontrar el valor de F y posteriormente multiplicarlo por el caudal unitario.

$$F = 0,874 * S^{-0,214} \dots \dots (3.52)$$

Donde:

S= es la pendiente y está expresado en porcentaje.

– **Longitud de la melga (Lme)**

Ahora bien, teniendo q_{or} y W, solo hace falta calcular la longitud de la melga Lme.; la cual se puede determinar por medio del nomograma de la figura 3.8. Para hacer uso de este nomograma, se debe de entrar con el caudal unitario real (q_{or}) en el eje de las ordenas e interceptar la recta que va en sentido diagonal correspondiente a la pendiente (S) y luego trazar una línea desde el punto de intercepción hasta llegar al eje de las abscisas.

Seguidamente, luego de calcular los parámetros anteriores (Lme, q_{or}) y el ancho de la melga (W), el cual ya se sabía con anterioridad, se utiliza la ecuación 3.50 para encontrar el valor del caudal por aplicar a la melga.

La longitud de la melga al igual que para diseño de riego por surcos, estará limitada por las dimensiones del terreno. De todas maneras, la longitud de la melga que se da en el nomograma solamente es un valor máximo recomendado.

f) Limitantes en el diseño

Luego de obtener el caudal por aplicar, también se debe calcular el caudal máximo no erosivo con el propósito de confirmar que el caudal obtenido no sobrepase éste, con el fin de que no se produzca erosión en el suelo; y por consiguiente, también obtener el caudal mínimo con el fin de que el agua alcance todos los puntos de la melga (Pascual 2008).

Dicho esto, el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos propuso 3 fórmulas útiles las cuales se expresan a continuación (Pascual 2008; Villalobos 2005).

Para cultivos no encespedantes (ej. Alfalfa, cereales) el caudal máximo no erosivo en L/s x m de ancho de la melga, se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{mx1} = 0,1765 * S^{-0,75} \dots \dots \dots (3.53)$$

Donde:

S= es la pendiente y se expresa en decimal, es decir m/m.

Para el caso de tener cultivos bien establecidos, encespedantes, el caudal máximo no erosivo en L/s x m de ancho de la melga se calculará con la siguiente ecuación:

$$Q_{mx2} = 0,353 * S^{-0,75} \dots \dots \dots (3.54)$$

Donde la pendiente (S) se expresa en decimal, es decir m/m.

El caudal por aplicar a la melga debe de ser mayor al caudal mínimo, el cual se puede calcular de la siguiente forma:

$$Q_{min} = \frac{0,00595 * L * S^{0,5}}{n} \dots \dots \dots (3.55)$$

Donde:

Q_{mín} = caudal mínimo en L/s x m de ancho de la melga.

n= es el coeficiente de rugosidad y se puede obtener mediante el cuadro 3.17 propuesto por Grassi (1987).

L= es la longitud de la melga en metros

S= la pendiente en decimal (m/m).

Cuadro 3. 17 Valores del coeficiente de rugosidad n (Fuente: Grassi 1987)

Cobertura	n
Superficie lisa y desnuda	0,04
Cultivos en líneas, en melgas a nivel	0,04
Cereales sembrados en hileras, si están trazadas en la dirección del flujo	0,1
Alfalfa, cereales, sembrados al voleo	0,15
Cultivos que forman una densa unión de la vegetación con la masa del suelo, y cereales sembrados transversalmente a la dirección del flujo.	0,25

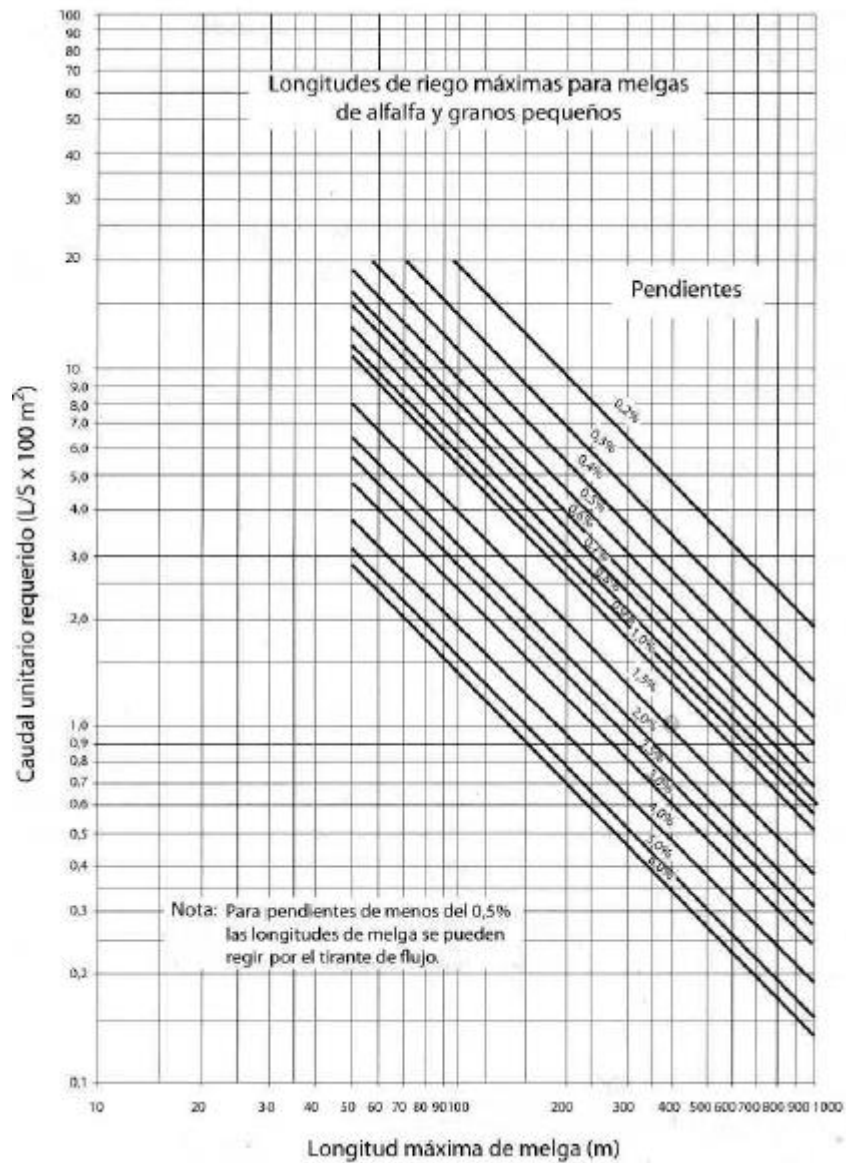


Figura 3. 8 Longitudes recomendadas de melgas (Fuente: Villalobos 2005)

g) Cálculo del tirante de agua en la melga (y)

La finalidad de calcular este parámetro, es con el propósito de determinar el bordo de la melga. El coeficiente “n” se puede tomar del cuadro 3.17. Mediante la siguiente expresión se calcula el tirante de agua en la melga:

$$y = \left(\frac{Q * n}{W * S^{0,5}} \right)^{3/5} \dots \dots \dots (3.56)$$

Donde:

y = es el tirante en la melga en m

Q = es el caudal aplicado a la melga, viene dado en m³/s

S = es la pendiente de la melga en m/m

W = es el ancho de la melga en m

n = es el coeficiente de rugosidad

h) Cálculo del bordo de la melga (B)

Mediante la siguiente ecuación se puede calcular la mínima altura que debe de tener el bordo de la melga:

$$B = 1,2 * y \dots \dots \dots (3.57)$$

Donde:

B es el bordo de la melga y “y” el tirante de agua de la melga, y vienen dados en m

i) Cálculo del tiempo de riego por melga (TR)

Como se tiene el dato del caudal de la melga, realizando la siguiente ecuación se obtiene el tiempo de riego:

$$TR = \frac{Lb * A}{Q * 360} \dots \dots \dots (3.58)$$

Donde:

TR= es el tiempo de riego expresado en horas

Lb= es la lámina bruta expresada en cm

A= es el área de la melga, viene dado en m²

Q= es caudal aplicado a la melga y viene dado en L/s

j) Tiempo que se dura en regar todo el campo (Tt)

Este parámetro involucra el área total del campo que está siendo regada y el área de cada melga así como otros factores, los cuales vienen dados por la siguiente expresión:

$$Tt = \frac{10000 * At * Tr}{W * L * N * H} \dots \dots \dots (3.59)$$

Donde:

Tt = Tiempo que se dura en regar todo el campo está dado en días

At= área efectiva bajo riego en ha

Tr= es el tiempo de riego por melga y viene dado en horas

L, W= son la longitud y el ancho de la melga, respectivamente, y están expresados en m

N= es el número de melgas que se riegan en forma simultánea

H= es el número de horas efectivas de riego al día

k) Melgas que se riegan por día (Nm)

Los parámetros para obtener este valor son los mismos de la ecuación (3.59), y están expresados de igual manera en la siguiente ecuación:

$$Nm = \frac{H * N}{Tr} \dots \dots \dots (3.60)$$

l) Área regada por día (Ad)

Si se desea obtener el dato del área en hectáreas que se regará por día, se puede obtener por medio de las 2 siguientes ecuaciones, en donde los parámetros de cada ecuación están nombrados anteriormente en las fórmulas 3.58 y 3.59; y vienen dadas de las siguientes maneras:

$$Ad = \frac{Nm * L * W}{10000} \dots \dots \dots (3.61)$$

ó

$$Ad = \frac{At}{Tt} \dots \dots \dots (3.62)$$

Donde:

Ad = área regada por día

Nm = melgas que se riegan por día

L y W = longitud y ancho de la melga, respectivamente, en m

At y Tt = área total efectiva bajo riego y tiempo que se dura en regar todo el campo, en ha y días, respectivamente

3.12.3. Riego por cuadros

Cisneros (2003) relata que este método es esencialmente un método de riego en melgas que son generalmente muy pequeñas (desde 6 m²) y que se forman cuadrículando pequeñas superficies limitadas por bordos, también llamados diques.

Este sistema de riego es adecuado para cultivos como el algodón, maíz, granos, maní, garbanzos, alfalfa y pastos, así como para muchas huertas y plantaciones. Es el método más sencillo entre todos los demás métodos de riego pero su principal inconveniente es que los

diques o bordos dificultan en extremo el uso de maquinaria agrícola utilizada para el cultivo o para la recolección de las cosechas (Booher 1974).

Según Villalobos (2005), en Costa Rica este tipo de método de riego se utiliza principalmente para el cultivo de cebolla.

El riego por cuadros se puede utilizar en terrenos en los cuales su micro relieve sea muy irregular, sin embargo la superficie del terreno donde esté cada cuadro deberá nivelarse si se quiere una máxima uniformidad de aplicación de agua. Por otra parte se dice que la diferencia de altura entre los bordos de cada cuadro puede ser de 6 a 9 cm en caso de que no tengan terrenos planos (Booher 1974).

Para este tipo de riego se recomienda que la altura de los bordos de cada cuadro sea de 20 cm, mientras que el tirante máximo de 15 cm (Cisneros 2003).

Los suelos a lo que mejor se adapta este método son los que presentan una velocidad de infiltración desde moderada a baja (Pascual 2008).

A continuación se muestra un sistema de riego por cuadros:

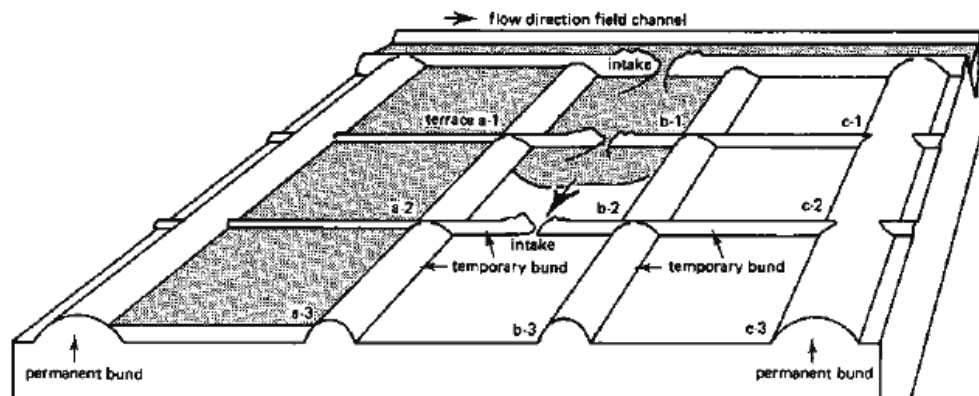


Figura 3. 9 Método de riego en cuadros (Fuente: Cisneros 2003)

3.12.3.1. Diseño de riego por cuadros: Método de Booher

Para realizar el diseño de cuadros, se puede utilizar el método de Booher (1974) el cual es un método empírico y permite seleccionar la superficie de los compartimentos en función del caudal de agua y de la textura de los suelos.

Para lo anterior dicho, este mismo autor propone el siguiente cuadro.

Cuadro 3. 18 Superficie de los cuadros propuestos para diferentes tipos de suelos y caudales de agua (Fuente: Booher 1974)

Caudal (l/seg)	Tipo de suelo			
	Arenoso	Fraco arenoso	Franco arcilloso	Arcilloso
	Hectáreas			
30	0,02	0,06	0,12	0,20
60	0,04	0,12	0,24	0,40
90	0,06	0,18	0,36	0,60
120	0,08	0,24	0,48	0,80
150	0,10	0,30	0,60	1,00
180	0,12	0,36	0,72	1,20
210	0,14	0,42	0,84	1,40
240	0,16	0,48	0,96	1,60
270	0,18	0,54	1,08	1,80
300	0,20	0,60	1,20	2,00

Según Pascual (2008), del anterior cuadro se obtiene el siguiente:

Cuadro 3. 19 Valores propuestos de caudal a aplicar (l/seg) por cada m² de superficie del cuadro, para suelos de diferente textura

Textura del suelo			
Arenosa	Franco arenosa	Franco arcillosa	Arcillosa
0,15	0,05	0,025	0,015

Por medio de este cuadro, el caudal por aplicar puede dejar de ser una incógnita en el diseño. Seguidamente Grassi (1987) propone la siguiente relación para obtener la longitud de cada cuadro:

$$L = \frac{Z}{S_o} \dots \dots \dots (3.63)$$

Donde:

L= es la longitud del cuadro en metros

Z= es el desnivel entre bordos y se expresan en metros

S_o= es la pendiente de cada cuadro y está expresada en m/m.

También se debe de calcular la eficiencia de aplicación, esto con el fin de obtener el tiempo de riego o tiempo de aplicación, y para ello se parte de la premisa de que al finalizar el tiempo de aplicación queda sobre el cuadro un volumen de agua tal que en cabecera se garantice la lámina neta, y en el pie la lámina neta más el desnivel Z (Pascual 2008).

Teniendo esto en cuenta se tiene la siguiente expresión que permite calcular la eficiencia de aplicación (Pascual 2008):

$$Efa = \frac{2}{2 + \frac{Z}{Ln}} * 100 \dots \dots \dots (3.64)$$

Donde:

Efa = eficiencia de aplicación (%)

Z = desnivel entre bordos extremos (cm ó mm)

Ln = lámina neta (cm ó mm)

De esta manera, habiendo calculado la eficiencia de aplicación mediante la ecuación 3.65, se calcula el tiempo de aplicación, el cual se puede determinar por medio de la siguiente expresión (Villalobos 2005):

$$Tap = \frac{Ln * A}{Efa * Q * 1000} \dots \dots \dots (3.65)$$

Donde:

L_n = es la lámina neta en mm o cm

E_{fa} = eficiencia de aplicación.

Q = caudal a aplicar y se da en m^3/h

A = área del cuadro en m^2 .

4. METODOLOGÍA

4.1. Localización y plazo utilizado para el estudio

El estudio se realizó en el terreno que se encuentra en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, en la sede central de Cartago, la cual se encuentra ubicada un kilómetro al sur de la Basílica Nuestra Señora de los Angeles (Figura 4.1). Las condiciones climáticas del área de estudio se pueden observar en el anexo 6.

El levantamiento topográfico, las pruebas de campo y recolección de muestras de suelos así como el análisis de los resultados fueron realizadas durante el tiempo de inicios de Febrero hasta mediados de Junio.

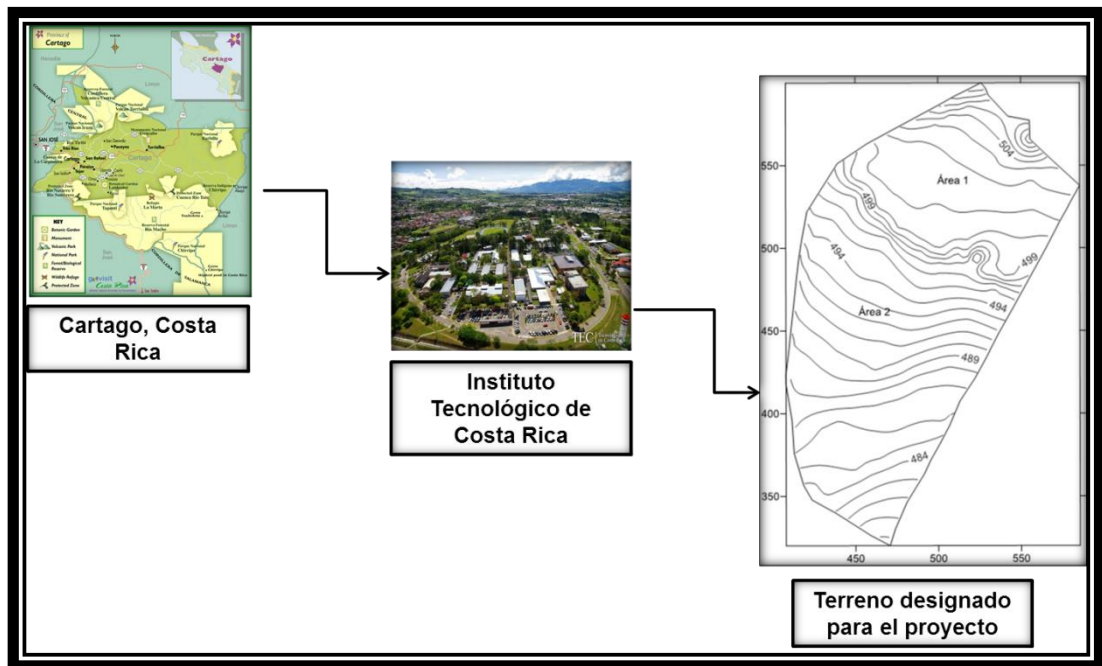


Figura 4. 1 Ubicación del área de estudio

4.2. Levantamiento topográfico y preparación del terreno.

Se procedió a hacer el levantamiento topográfico del terreno, con estación total facilitada por la Escuela de Ingeniería Agrícola, con la cual se midió el área total del terreno. Las variables que fueron tomadas en cuenta a la hora de la delimitación del área de riego,

fueron el lindero marcado por el borde interior de la acera y por las zanjas de drenaje, al lado contrario.

También se procedió a realizar los cálculos para el movimiento de tierras, limitando el área del terreno en una unidad de riego, y cuadrículándola posteriormente. Se utilizó el método de mínimos cuadrados para encontrar las pendientes medias de las secciones y luego según diferentes criterios se escogieron las pendientes de diseño para adecuar las pendientes idóneas para el área de regadío. Se puede mostrar a continuación el área de riego que fue delimitada para el proyecto:

4.3. Muestreo de suelos y análisis de muestras de suelo recolectadas en el campo

Como el área total del terreno está dividida en dos secciones, se realizó un muestreo (explicado en 4.3.1) en esas dos áreas. Por cada sección se obtuvieron muestras de suelo indisturbadas y disturbadas a tres diferentes profundidades, las cuales fueron:

- a) Primer muestreo: 0-20 cm
- b) Segundo muestreo: 20-40 cm
- c) Tercer muestreo: 40-75 cm

4.3.1. Pruebas de laboratorio

Para todas las muestras que se obtuvieron se localizaron 3 perfiles del suelo bien diferenciados en cada terreno, por lo tanto para cada punto a continuación se extrajo una muestra de cada perfil, por cada prueba.

Las muestras del suelo fueron obtenidas y procesadas de la siguiente manera:

Para el secado de las pruebas de textura y obtención de los coeficientes hídricos del suelo se utilizaron los siguientes dos hornos:



Figura 4. 2 Hornos utilizados para el secado de muestras en los procesos de obtención de textura y para obtener los coeficientes hídricos del suelo.

- a) Se sacaron 6 muestras de suelo disturbado mediante una pala, tres muestras por cada área (una muestra por cada perfil del suelo), almacenándose en bolsas plásticas rotuladas, para luego realizar la prueba de textura mediante el método de Bouyoucus mencionado en el presente trabajo. Del proceso realizado en el laboratorio para el cálculo de la textura del suelo y su granulometría se obtuvieron las siguientes fotos (figura 4.3, 4.4, 4.5, 4.6):



Figura 4. 3 Muestras de suelo con CALGON y agua destilada en beaker de 400 ml cada una



Figura 4. 4 Batidora con muestra de suelo en el envase y pipeta



Figura 4. 5 Seis muestras de suelo en el cilindro de Bouyoucus (minutos antes de realizar la prueba)



Figura 4. 6 Hidrómetro con el que se tomaron las medidas necesarias para realizar el experimento

- b) Se extrajeron 6 muestras de suelo indisturbado con anillos muestreadores, tres por cada área, para determinar las humedades gravimétricas a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente mediante el método de ollas de presión explicado en el apartado 3.7.3.1. Seguidamente se muestran algunos de los materiales utilizados para realizar el método de ollas de presión para la obtención de los coeficientes hídricos del suelo:



Figura 4. 7 Ollas de presión y plato de porcelana (sobre la olla sin tapa)



Figura 4. 8 Anillos con malla, liga de hule y suelo reposando sobre agua para saturar el suelo; en una bandeja de plástico.



Figura 4. 9 Bandeja de aluminio, anillo de metal y muestra de suelo (después del secado en el horno)

- c) También se tomaron 6 muestras de suelo indisturbado en total, con cilindros muestreadores de 4,9 cm de diámetro y de altura, para obtener el peso específico aparente del suelo por medio del procedimiento de laboratorio utilizando cilindros de volumen conocido descrito en 3.4.1.4.

De igual manera, en la siguiente y última foto se pueden apreciar los cilindros muestreadores con la muestra del suelo recolectada para aplicar el método de cilindros de volumen conocido y obtener el peso específico aparente, y también se muestran las bandejas de plástico en la cual se saturaron las muestras.



Figura 4. 10 Nótese las muestras que fueron utilizadas son las que se encuentran en la bandeja color anaranjada

4.4. Pruebas de infiltración

Se realizaron cuatro pruebas de infiltración para obtener la infiltración básica presente en el terreno y la infiltración promedio. Se realizó la prueba de infiltración por medio del método del infiltrómetro de doble cilindro explicado en el apartado 3.6.3. Los materiales usados fueron:

- a) Dos cilindros de acero
- b) Una regla graduada
- c) Pissetas
- d) Estañones rellenos con agua para abastecer de agua las pruebas.

Los materiales se muestran a continuación en las siguientes figuras (figura 4.11 y 4.12):



Figura 4. 11 Tractor que transporta los estañones de abastecimiento de agua para las pruebas de infiltración



Figura 4. 12 Doble cilindro infiltrómetro y regla graduada

Luego de obtener los datos de las pruebas acomodados con el formato de cuadro del cuadro 3.2 presente en el apartado 3.6.4, por medio del programa estadístico *Minitab 16* se obtuvieron las ecuaciones del modelo de Kostiakov, explicadas en la sección 3.6.4.

4.5. Recaudación de datos climatológicos de la estación meteorológica del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Por medio de una solicitud formal al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), se pidieron datos de la estación meteorológica ubicada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, en la sede central de Cartago, de:

- Temperaturas máximas y mínimas diarias
- Precipitaciones diarias
- Humedades relativas máximas y mínimas diarias
- Velocidad y dirección de vientos predominantes diarios
- Radiación solar diaria
- Horas de radiación solar

4.5.1. Limitantes para el cálculo de la evapotranspiración

Según el IMN, no se tienen datos recolectados de horas de radiación solar, por lo tanto este dato no pudo ser conseguido y se imposibilita la manera de obtener la evapotranspiración potencial por medio de los métodos de Penman modificado por la FAO, y Blaney y Criddle, entre otros.

4.5.2. Análisis de los datos climatológicos

Se determinó la evapotranspiración potencial y real por medio del método de Hargreaves, mediante la fórmula 3.27.

Luego se procedió a determinar los déficits que se producen en cada mes, durante el ciclo del cultivo, el cual también va a ser cuando se va a producir el riego. Anteriormente se obtuvo la precipitación efectiva por medio de las ecuaciones de Brouwer y Heibloem (3.29 y 3.30).

4.6. Diseño de sistemas de riego superficial

Para el diseño de los sistemas de riego por surcos y melgas se utilizó como cultivo de siembra el maíz mientras que para los cuadros se escogió el de la cebolla.

De acuerdo al proceso de cálculo explicado en la metodología para el diseño de cada sistema de riego, y siguiendo la secuencia mostrada se realizó lo siguiente:

- a) Para el cálculo de la lámina neta en los sistemas de surcos y melgas se procedió a realizar el cálculo de la lámina neta por cada estrato del perfil del suelo, lo que equivale a lo siguiente:
 - Se tomará 20 cm del primer estrato (0-20 cm)
 - Se tomará 20 cm del segundo estrato (20-40 cm)
 - Se tomará 10 cm del tercer estrato (40-50 cm), ya que de los anteriores estratos se tienen 40 cm en total, ya que cada estrato fue de 20 cm, por lo tanto si la profundidad de raíces se toma de 50 cm, se necesitan solo 10 cm del tercer estrato para llegar a esa profundidad.
- b) Para el cálculo de la lámina neta para el diseño del sistema de riego por cuadros se utilizaron 20 centímetros del primer estrato de suelo y 5 centímetros del segundo estrato.
- c) Con base en todos los datos anteriormente recolectados y procesados, así como cálculos previos al diseño en sí (como las láminas obtenidas, cálculo de la evapotranspiración, etc.); se realizó el diseño del sistema de riego por surcos siguiendo la metodología explicada en el punto 3.12.1.1.
- d) También se realizó el diseño de riego por melgas basado en la metodología presente en el punto 3.12.2.1.
- e) Por último se realizó el diseño de riego por cuadros, basado en el método de Booher (3.12.3.2.)

4.6.1. Limitante de diseño

Para el cálculo de las longitudes de los surcos y melgas, estas se vieron limitadas por las dimensiones de la finca. Esto conlleva a que los valores propuestos de los cuadros y nomogramas no sean utilizados como ninguna aproximación en este diseño.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Tipo de estudio

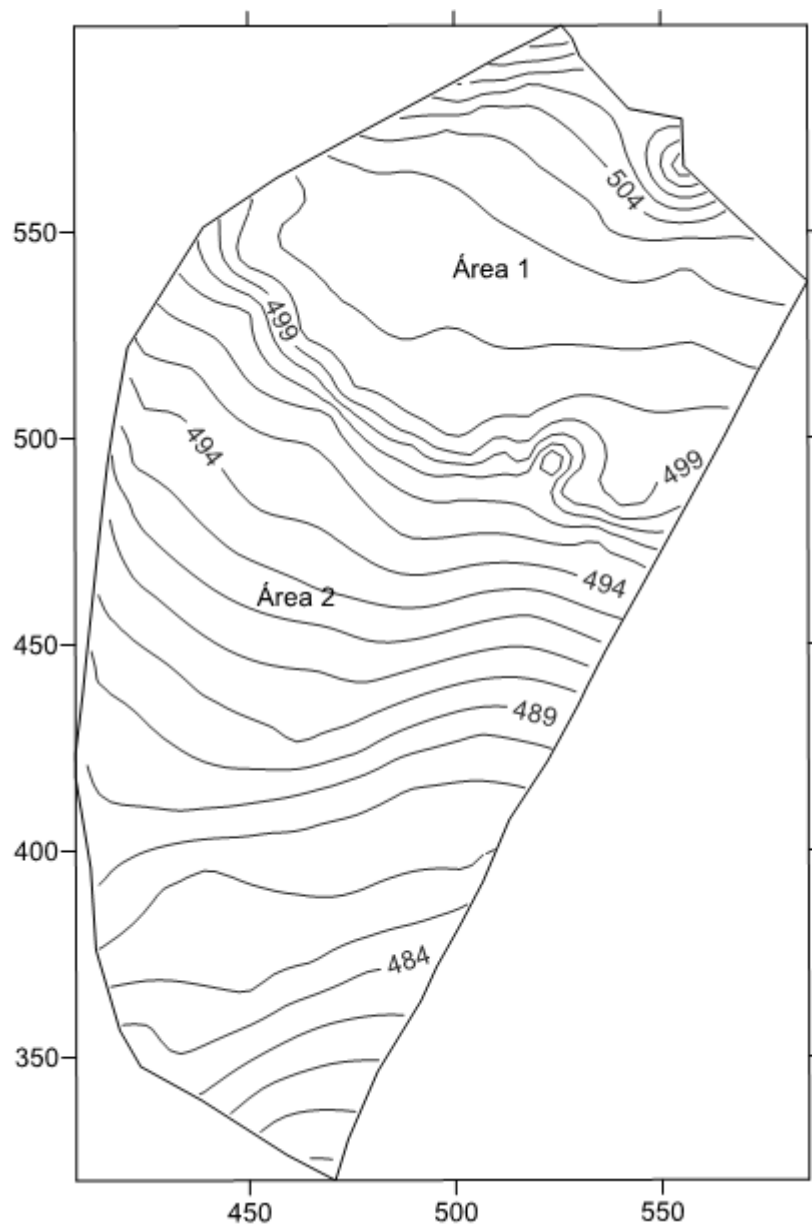
El presente trabajo de investigación es un estudio de tipo analítico experimental.

5.2. Presentación de planos topográficos

Del levantamiento topográfico realizado en el terreno, se obtuvo como resultado el siguiente plano (Figura 5.1), el cual representa la totalidad del terreno el cual incluye las dos secciones en las cuales se dividirá el área total del terreno. Esta figura también muestra las curvas de nivel del terreno a 1 metro de separación entre ellas.

Según la primera subdivisión que se le ha dado al terreno, el área del terreno A_1 es equivalente a 1,071 ha aproximadamente, mientras que para el área del terreno A_2 es de 1,803 ha aproximadamente.

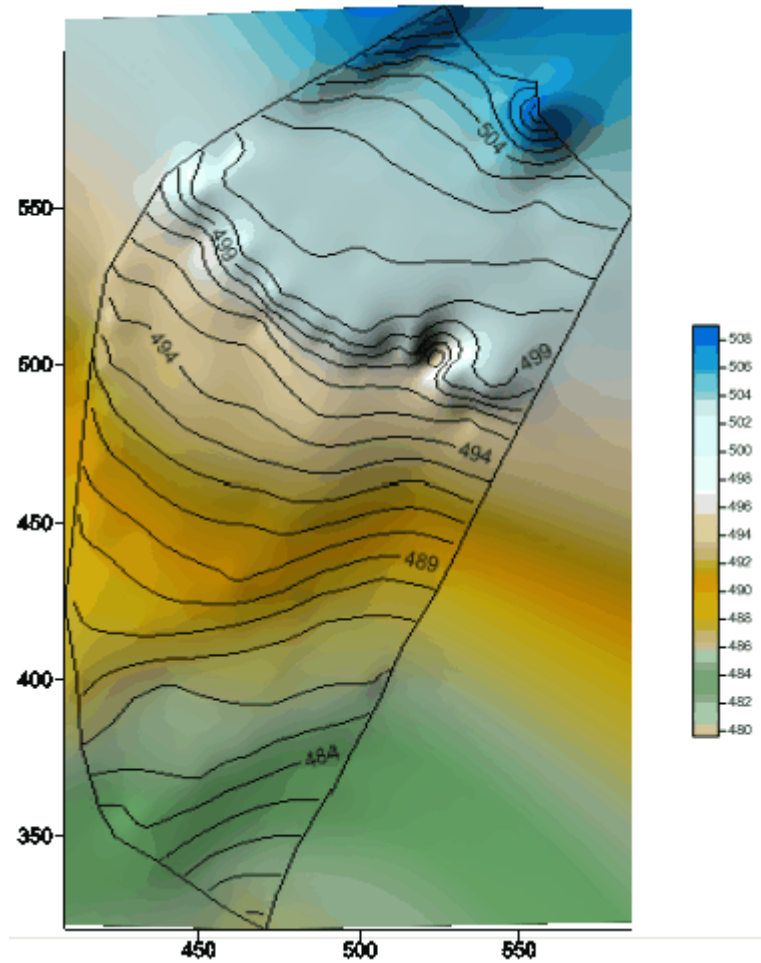
En la figura 5.1 se muestran las dos áreas en las que se dividió el terreno, importante destacar que en el siguiente plano, también se muestran las curvas de nivel. La curva de nivel perteneciente a la cota de 499 metros nos puede referenciar en el plano y servir como línea divisoria entre cada área.



Surfer 11

Figura 5. 1 Curvas de nivel del terreno donde se realizó el estudio

Seguidamente se elaboró un plano de la superficie del terreno en 3^{ra} dimensión (Figura 5.2), con la ayuda del comando de Surfer llamado 3D Surface, con el cual podemos observar la disposición de las 2 secciones en que se dividió el terreno, en las cuales, una la forma la parte de color grisáceo y azul la cual corresponde a la parte más elevada del terreno.



Surfer 11

Figura 5. 2 Plano en 3D de la superficie del terreno

La figura 5.2 nos ayuda a poder ver claramente cómo la sección más elevada, es decir el área A_1 es un área con menos irregularidades en comparación con A_2 . También se puede observar que el terreno en estudio está constituido de grandes irregularidades, y por lo tanto muchas pendientes diferentes.

5.3. Movimiento de tierras

Antes de realizar el movimiento de tierras para nivelar el terreno, primeramente se encontraron las pendientes medias naturales de cada área, para seguidamente tomar la decisión de si nivelar o no.

Aproximadamente se tienen 0,8 ha disponibles del terreno A_1 , sabiendo esto se hicieron las cuadrículas del terreno del área A_1 , limitando el terreno en una unidad de riego la cual será nivelada. El reducir el área de riego se realiza con el fin de tener que hacer el menor número de cortes y rellenos en el terreno; y por lo tanto reducir la mano de obra y costos del movimiento de tierra, ya que debido a su irregularidad conllevarían enormes costos si se nivelara la totalidad del área.

El área de trabajo escogida en la que se dividió el terreno para riego, está representada en la figura 5.3, y es de una extensión de $5112,25 \text{ m}^2$.

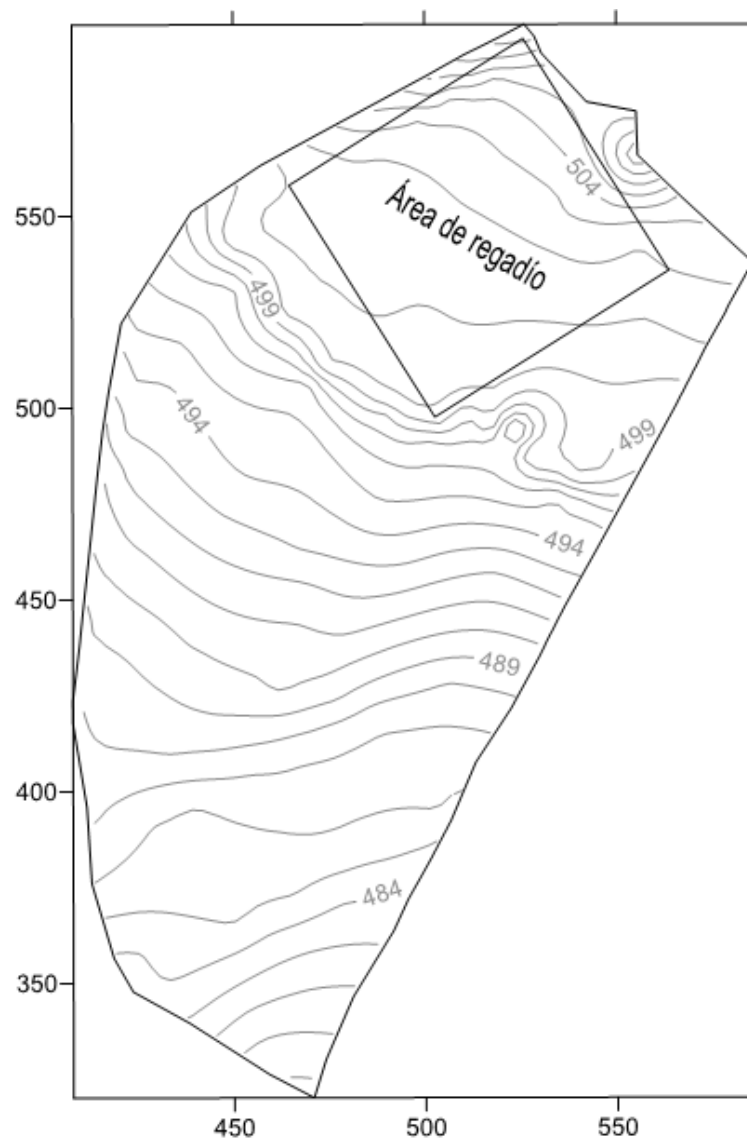
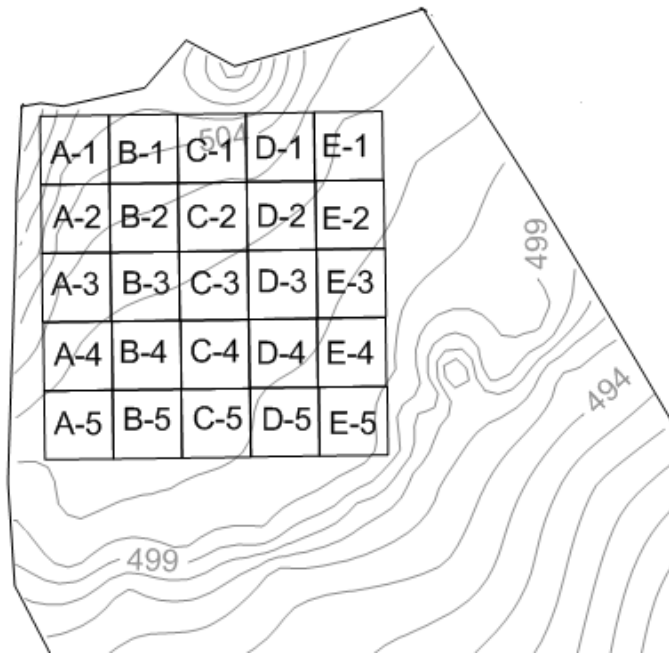


Figura 5. 3 Plano topográfico del área disponible para el proyecto, con el área que va a ser utilizada para riego señalada

Luego de haber elegido el área para riego, se procede a realizar y nombrar las cuadrículas, las cuales se muestran a continuación en la figura 5.4:



Surfer 11

Figura 5. 4 Vista de cerca de las cuadrículas para la nivelación del terreno A₁ y su orientación

Con el siguiente mapa, se puede observar de una mejor manera la ubicación de las cuadrículas terminadas, del sector elegido para nivelar.

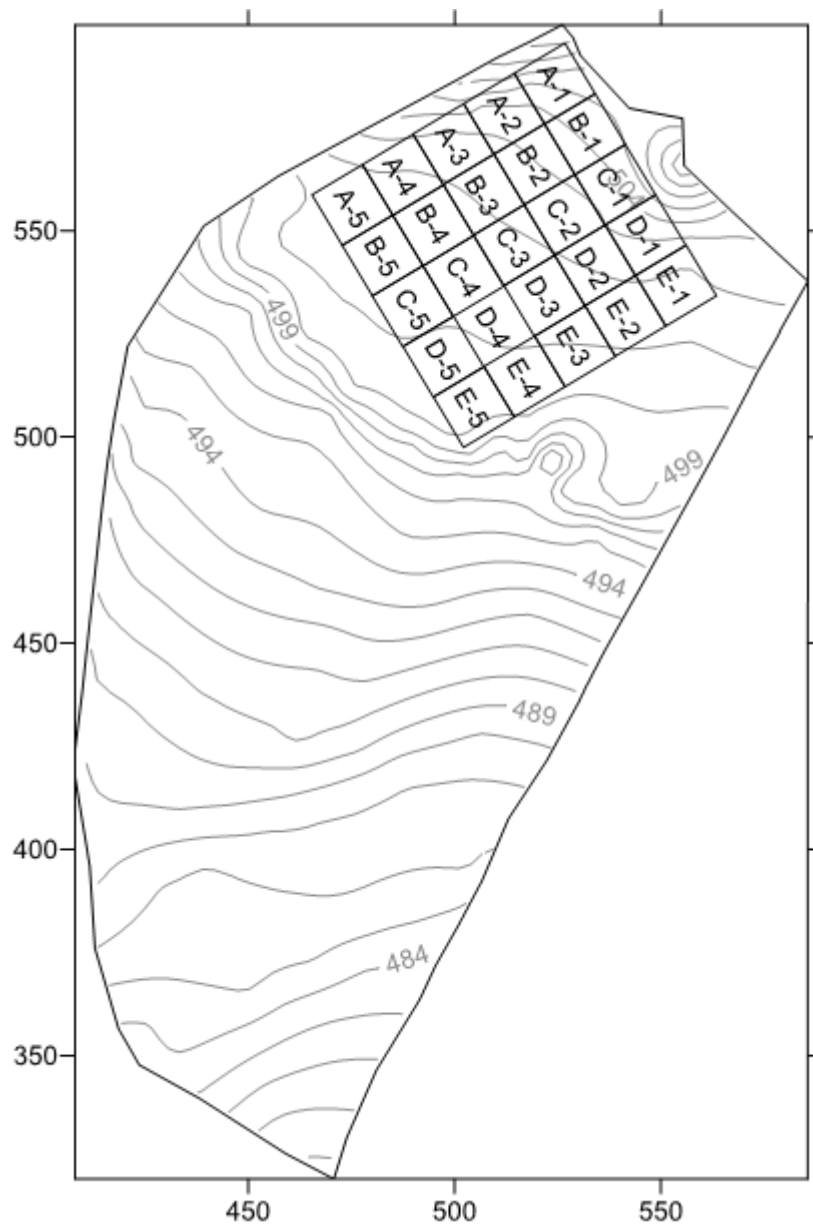


Figura 5.5 Mapa del terreno total y ubicación de las cuadrículas para el terreno A₁

Cabe destacar que las cuadrículas de la unidad de riego son de 14,3 x 14,3 m. Así mismo, se obtuvieron las alturas medias del centroide de cada cuadrícula (cotas primitivas), para el caso de la unidad de riego, teniéndose así las siguientes figuras (5.6 y 5.7).

	Norte					
	A-1	B-1	C-1	D-1	E-1	
	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2	
Oeste	A-3	B-3	C-3	D-3	E-3	Este
	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4	
	A-5	B-5	C-5	D-5	E-5	
	Sur					

Figura 5. 6 Representación de la forma en que se trabajarán las cuadrículas

	14,3 m					14,3 m		
14,3 m	505,8245	504,2804	504,1023	503,2253	501,9996		14,3 m	
	504,3575	502,9724	502,6157	502,1295	501,4557			
	503,1361	502,1603	501,8505	501,4867	500,9523			
	502,1855	501,6423	501,3905	501,1094	500,5724			
	501,5225	501,3353	501,1153	500,8707	500,2055		14,3 m	

Figura 5. 7 Plano topográfico empleado para trabajo de nivelación del terreno, que indica cotas centroides originales de la superficie del terreno

Para encontrar la pendiente natural media del terreno mediante el método de mínimos cuadrados, primero se generó el siguiente cuadro 5.1, necesario para obtener la pendiente en dirección Oeste – Este.

Cuadro 5. 1 Valores necesarios para la ecuación 3.2 del método de mínimos cuadrados

X	h	Xh	X ²
0	503,4052	0	0
14,3	502,4781	7185,43683	204,49
28,6	502,2145	14363,3347	817,96
42,9	501,7643	21525,6885	1840,41
57,2	501,0371	28659,3221	3271,84
Σ	143	2510,8992	71733,7821

Nótese que las cotas usadas (h) en el cuadro 5.1 corresponden a los promedios de cotas obtenidos de cada columna.

Ahora bien, utilizando la ecuación 3.2 y con ayuda del cuadro x, se tiene así:

$$P_{O-E} = \frac{71733,7821 - \frac{2510,8992 * 143}{5}}{6134,7 - \frac{143^2}{5}}$$

$$P_{O-E} = -0,038 = -3,8 \% ((-) \text{ indica que la pendiente va en sentido decreciente})$$

Aplicando el mismo proceso para obtener la pendiente natural media del terreno de Norte – Sur, se generó el siguiente cuadro 5.2.

Cuadro 5. 2 Valores necesarios para la ecuación 3.1 del método de mínimos cuadrados

Y	h	Yh	Y ²
0	503,8864	0	0
14,3	502,7062	7188,69866	204,49
28,6	501,9171	14354,8291	817,96
42,9	501,38	21509,202	1840,41
57,2	501,0099	28657,7663	3271,84
Σ	143	2510,8996	71710,496

Nótese que los valores usados en (h) son las cotas promedio obtenidas de cada fila.

Utilizando la ecuación 3.1 se obtuvo el siguiente resultado:

$$S_{N-S} = \frac{71710,496 - \frac{2510,8996 * 143}{5}}{6134,7 - \frac{143^2}{5}}$$

$$S_{N-S} = -0,049 = -4,9 \%$$

Luego de obtener pendientes del terreno de 3,8 % de oeste a este y 4,9 % de norte a sur, se sabe con antemano que cualquier trabajo de nivelación que se quiera realizar se debe de hacer una gran inversión inicial, ya que estamos hablando de una nivelación de tercer grado según el cuadro 3.1 proporcionado por Lázaro, *et al* (2010).

Al tener pendientes de 3,8 % y 4,9 % para poder aplicar riego por surcos, las pendientes de riego por surcos según el cuadro 3.6 aceptables en este tipo de método son de 0 – 2 %, para valores arriba de 2% se tienen eficiencias de aplicación muy bajas (menores de 55%), por lo tanto no se tendrán pendientes mayores de 2% para este caso.

Mientras que para el caso de riego por melgas tampoco es muy distinto al anterior, ya que se recomiendan pendientes de hasta 2%, y en caso de tener cultivos bien establecidos se pueden usar pendientes de hasta 4 % según la literatura; sin embargo, debido al hecho de que se diseñará para el cultivo de maíz el cual no es un cultivo tan denso, se tomará también como pendiente máxima de 2%.

Tomando esto como criterio, se elegirán pendientes favorables para la implementación de riegos por surcos y melgas, por lo tanto, se formuló aplicar unas pendientes de diseño de 1,5 % para de Norte a Sur (N-S) y 2% para Oeste a Este. De manera que el sentido de riego el cual se da donde se propicie la mayor pendiente, sería de Oeste a Este para la pendiente del 2%. No se eligieron pendientes menores a estas, por el hecho de que pendiente mucho más bajas que las naturales propiciarían aún más movimientos de tierras (y por ende el costo se incrementa) que los obtenidos.

El criterio de elección de los sentidos de las pendientes, es debido a que se tiene pensado el realizar el riego de Oeste a Este ya que se planea colocar la manga de riego de PVC

en el sentido de Norte a Sur, según los planos y también para que los cultivos no se provoquen sombra entre sí.

Siguiendo con el método de cálculo, mediante la ecuación 3.3 se procedió a calcular cada cota del proyecto para luego obtener cuánto se debe de cortar y rellenar por cada cuadrícula, restando la cota primitiva u original del terreno menos la cota del proyecto o cota nueva calculada. Anteriormente, para poder utilizar dicha ecuación se obtuvo la cota promedio o centroide del terreno que se va a nivelar.

Se realizó sumando los valores de todas las cotas promedio de filas y columnas (h) contempladas en los cuadros x y x; o lo que es igual, sumando las 5 cotas de cada fila y luego las de cada columna para al final dividir su resultado entre diez, el cual es el número de cotas promedio total que se tiene.

$$Cota\ promedio\ o\ centroide\ (Hm) = \frac{2510,8992 + 2510,8996}{10} = 502,1798$$

Substituyendo las pendientes de 1,5 % N-S y 2% de O-E y la cota promedio calculada en la ecuación 3.3 se obtiene así el siguiente cuadro 5.3, el cual muestra donde se localiza cada corte (-) y relleno (+) para obtener la nivelación y las cotas nuevas resultantes, así como las cotas originales o naturales del terreno, que llamaremos cotas primitivas; éstas últimas tomadas de la figura 5.7.

Cuadro 5.3 Cortes, rellenos y cotas del proyecto del área de riego del terreno A₁

Nomenclatura	A-1	B-1	C-1	D-1	E-1
Cota primitiva	505,8245	504,2804	504,2253	503,2253	501,9996
Cota del proyecto	503,1808	502,8948	502,6088	502,3228	502,0368
Corte (-) / relleno (+)	-2,6437	-1,3856	-1,6165	-0,9025	0,0372
Nomenclatura	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2
Cota primitiva	504,3575	502,9724	502,6157	502,1295	501,4557
Cota del proyecto	502,9663	502,6803	502,3943	502,1083	501,8223
Corte (-) / relleno (+)	-1,3912	-0,2921	-0,2214	-0,0212	0,3666
Nomenclatura	A-3	B-3	C-3	D-3	E-3
Cota primitiva	503,1361	502,1603	501,8505	501,4867	500,9523
Cota del proyecto	502,7518	502,4658	502,1798	501,8938	501,6078
Corte (-) / relleno (+)	-0,3843	0,3055	0,3293	0,4071	0,6555
Nomenclatura	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4
Cota primitiva	502,1855	501,6423	501,3905	501,1094	500,5724
Cota del proyecto	502,5373	502,2513	501,9653	501,6793	501,3933
Corte (-) / relleno (+)	0,3518	0,609	0,5748	0,5699	0,8209
Nomenclatura	A-5	B-5	C-5	D-5	E-5
Cota primitiva	501,5225	501,3353	501,1153	500,8707	500,2055
Cota del proyecto	502,3228	502,0368	501,7508	501,4648	501,1788
Corte (-) / relleno (+)	0,8003	0,7015	0,6355	0,5941	0,9733

En el anterior cuadro 5.3, se puede observar la cuadrícula C-3, la cual es la cota promedio del terreno en total o centroide (Hm), con la cual partimos para todos los cálculos de las cotas nuevas del proyecto.

También, mediante el cociente de la sumatoria entre cortes y rellenos se puede obtener la relación entre corte/ relleno; y verificar que sea superior a 1.

$$Relación_{C/R} = \frac{\sum \text{cortes}}{\sum \text{rellenos}}$$

$$Relación_{C/R} = \frac{8,8585}{8,7323} = 1,0144$$

Como se puede apreciar, nótese que 1,0144 es superior a 1, por lo tanto teóricamente la nivelación está correcta. También se observa que los valores de cortes y rellenos nos hablan de que se está en presencia de una nivelación bastante importante.

Se pueden calcular los volúmenes de corte y relleno fácilmente, ya que como un volumen es igual a un área por una altura, simplemente multiplicando la altura (\sum corte y/o \sum relleno) por el área de la cuadrícula, la cual se tenía que su área fue 14,3 x 14,3 m; se obtiene dicho valor. Dicho esto se tiene:

$$\text{Volúmen}_{\text{corte1}} = 8,8585 * 14,3 * 14,3 = 1811,47 \text{ m}^3$$

$$\text{Volúmen}_{\text{relleno1}} = 8,7323 * 14,3 * 14,3 = 1785,67 \text{ m}^3$$

Realizando un estimado de la cotización del movimiento de tierras, se tiene que por metro cúbico movido cuesta 180 dólares, por lo tanto la obra en total sería equivalente a \$ 326064.

Para el caso de que se quisiera nivelar el terreno de manera que la pendiente de O-E fuera la propuesta en el diseño, es decir de 2% y darle a la pendiente de N-S una pendiente relativamente suave de 0,5% para que no haya mucho problema con el movimiento del flujo transversalmente, si se realiza el mismo procedimiento que el anteriormente explicado se obtienen volúmenes de corte y relleno aún más altos que los anteriores, y estos se muestran a continuación:

$$\text{Volúmen}_{\text{corte2}} = 10,8233 * 14,3 * 14,3 = 2213,26 \text{ m}^3$$

$$\text{Volúmen}_{\text{relleno2}} = 10,6971 * 14,3 * 14,3 = 2187,45 \text{ m}^3$$

Como se puede ver, la relación de corte/relleno es superior a uno, y existen diferencias hasta de más de 400 m³ de volumen que hay que cortar y rellenar con respecto a las pendientes de diseño primeras. En caso de que se quieran observar los sectores donde se producen los cortes y rellenos y las cotas nuevas del proyecto para esta última nivelación se puede observar al Anexo 11.

El sentido del curso del flujo no va a variar ni el diseño en sí en caso de que se desee tomar la primera nivelación o la segunda nivelación propuesta. La segunda nivelación al contar con una pendiente transversal N-S más leve, resulta más idónea para realizar el diseño del sistema integrado de riego superficial.

Luego de obtener los volúmenes de corte y relleno se establece que se requiere de una nivelación importante, ya que supera notablemente los niveles establecidos de $700 \text{ m}^3/\text{ha}$. Sin embargo, el diseño se hará suponiendo que se realizará esta nivelación ya que el acortar el área o realizar nivelaciones con pendientes similares a las naturales del terreno (por ejemplo: 3,8% O-E y 3% N-S, 3 O-E y 2,5 % N-S) también arrojan valores similares de movimientos de tierras o peor aún; se encontraron relaciones de corte/relleno por debajo de la unidad (por ejemplo: 0,71), es decir se corta menos de lo que se tiene que rellenar lo cual significa que hay falta de material.

En lo que respecta el área A_2 , se procedió a hacer el mismo procedimiento realizado anteriormente; y lo primero que se procedió a hacer fue elegir un área menor a la del terreno (o una unidad de riego que se desea nivelar) y hacerle propiciar las pendientes más aptas para riego para determinar el costo de la obra.

En la figura siguiente se muestra como se colocaron las cuadrículas.

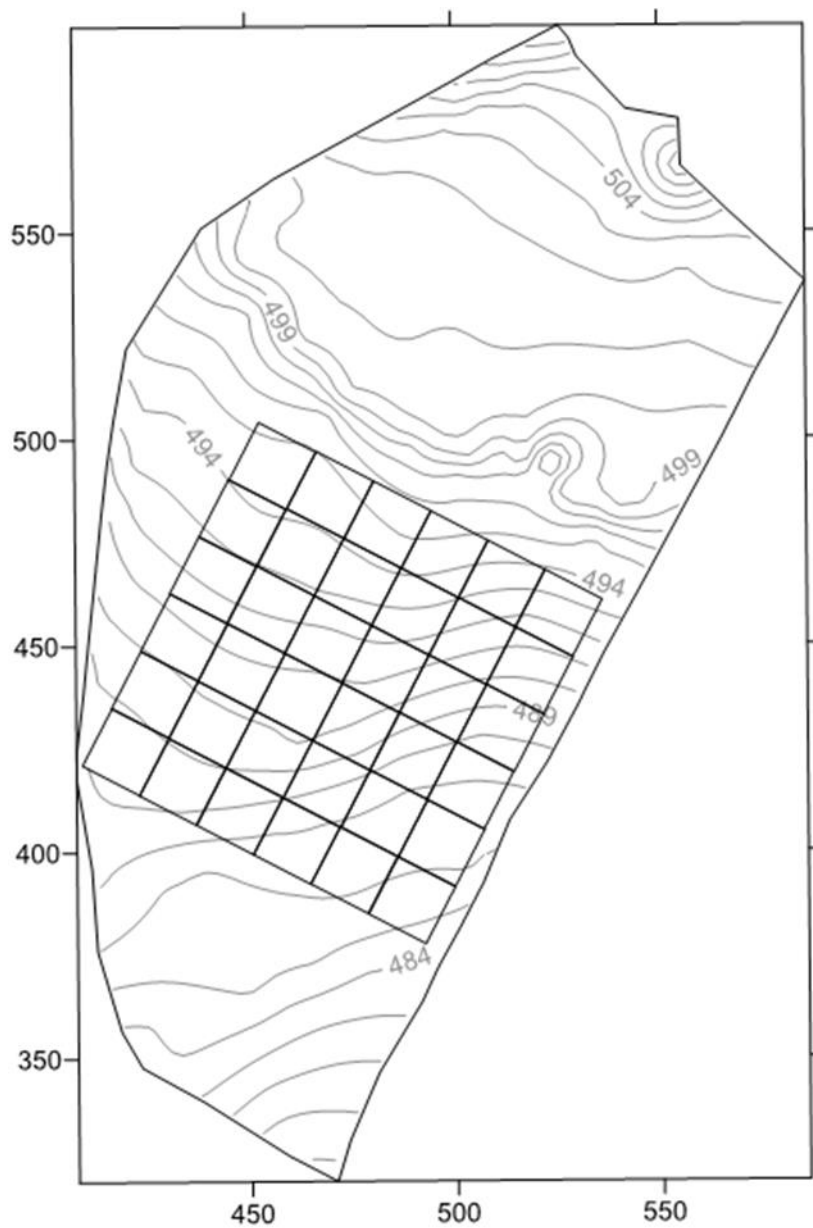


Figura 5. 8 Mapa del terreno total y las cuadrículas del área A₂

De la misma manera como se ha venido haciendo, se procede a mostrar en el siguiente plano (Figura 5.9) elaborado en el programa Surfer 11, con más detalle, las cuadrículas realizadas en el área 2.

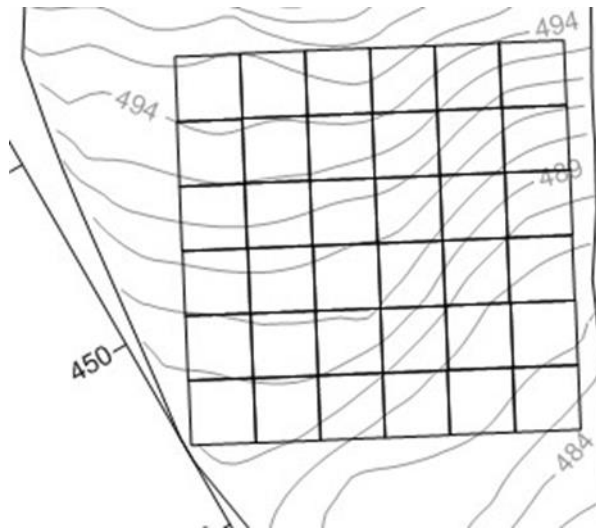


Figura 5. 9 Vista de cerca de las cuadrículas realizadas para el área A₂

Seguidamente se tienen las cotas iniciales promedio del terreno (cotas primitivas), a cuadrículas de 15,68 x 15,68 m obtenidas del programa Surfer 11, serían las siguientes propuestas en la figura 5.10:

15,68 m						
494,5934	494,7505	494,9400	494,4346	493,3110	492,5036	15,68 m
493,4836	493,5084	493,3844	492,7337	491,4519	490,3648	
492,1519	492,1466	491,8715	491,1033	489,6940	488,4930	
490,7365	490,7776	490,5808	489,6665	488,1312	487,0901	
489,4966	489,5978	489,3045	488,2375	486,9960	486,2288	
488,5224	488,4483	487,8034	486,9323	486,2201	485,4206	

Figura 5. 10 Cotas primitivas del terreno

Seguidamente se obtuvieron los promedios de cada fila y columna teniéndose así los siguientes cuadros 5.4 y 5.5:

Cuadro 5. 4 Valores necesarios para obtener la pendiente O-E

	X	H	Xh	X2
	0,0000	491,4974	0,0000	0,0000
	15,6800	491,5382	7707,3190	245,8624
	31,3600	491,3141	15407,6102	983,4496
	47,0400	490,5179	23073,9620	2212,7616
	62,7200	489,3007	30688,9399	3933,7984
	78,4000	488,3502	38286,6557	6146,5600
Σ	235,2000	2942,5185	115164,4868	13522,4320

Cuadro 5. 5 Valores necesarios para obtener la pendiente N-S

	Y	H	Yh	Y2
	0,0000	494,0889	0,0000	0,0000
	15,6800	492,4978	7722,3655	245,8624
	31,3600	490,9101	15394,9392	983,4496
	47,0400	489,4971	23025,9444	2212,7616
	62,7200	488,3102	30626,8157	3933,7984
	78,4000	487,2245	38198,4021	6146,5600
Σ	235,2000	2942,5285	114968,4669	13522,4320

Así mismo, con las sumatorias obtenidas en los cuadros 5.4 y 5.5, y mediante las ecuaciones 3.1 y 3.2 se calcularon las pendientes resultando así los siguientes valores:

$$S_{O-E} = -4,24 \%$$

$$S_{N-S} = -8,80 \%$$

Buscando nivelar el terreno cuadrículado a pendientes de oeste a este y norte a sur de 3% con el fin de reducir las pendientes (se eligió mayor pendiente que para el área 1 ya que las pendientes medias para el área 2 resultaron notablemente más elevadas), se originó el

siguiente el cuadro 5.6 el cual muestra las cotas nuevas las cual debe de tener el terreno y cortes y rellenos.

Cuadro 5. 6 Cortes, rellenos y cotas del proyecto del área de riego del terreno A₂

Cota primitiva	494,5934	494,7505	494,94	494,4336	493,311	492,5036
Cota del proyecto	492,3022	491,8318	491,3614	490,891	490,4206	489,9502
Corte (-) / relleno (+)	-2,2912	-2,9187	-3,5786	-3,5426	-2,8904	-2,5534
Cota primitiva	493,4836	493,5084	493,3844	492,7337	491,4519	490,3648
Cota del proyecto	491,8318	491,3614	490,891	490,4206	489,9502	489,4798
Corte (-) / relleno (+)	-1,6518	-2,147	-2,4934	-2,3131	-1,5017	-0,885
Cota primitiva	492,1519	492,1466	491,8715	491,1033	489,694	488,493
Cota del proyecto	491,3614	490,891	490,4206	489,9502	489,4798	489,0094
Corte (-) / relleno (+)	0,7905	1,2556	1,4509	1,1531	0,2142	-0,5164
Cota primitiva	490,7365	490,7776	490,5808	489,6665	488,1312	487,0901
Cota del proyecto	490,891	490,4206	489,9502	489,4798	489,0094	488,539
Corte (-) / relleno (+)	0,1545	-0,357	-0,6306	-0,1867	0,8782	1,4489
Cota primitiva	489,4966	489,5978	489,3045	488,2375	486,996	486,2288
Cota del proyecto	490,4206	489,9502	489,4798	489,0094	488,539	488,0686
Corte (-) / relleno (+)	0,924	0,3524	0,1753	0,7719	1,543	1,8398
Cota primitiva	488,5224	488,4483	487,8034	486,9323	486,2201	485,4206
Cota del proyecto	489,9502	489,4798	489,0094	488,539	488,0686	487,5982
Corte (-) / relleno (+)	1,4278	1,0315	1,206	1,6067	1,8485	2,1776

De la suma de todos los cortes y rellenos se obtuvo los siguientes valores (se hizo el mismo procedimiento que el realizado para el primer terreno):

$$\sum_{\text{Cortes}} = 30,4576$$

$$\sum_{\text{Relleno}} = 20,6437$$

$$\text{Relación}_{C/R} = \frac{30,4576}{20,6437} = 1,4754$$

$$\text{Volúmen}_{\text{corte}} = 30,4576 * 15,68 * 15,68 = 7488,3786 \text{ m}^3$$

$$Volúmen_{relleno} = 20,6437 * 15,68 * 15,68 = 5075,5096 m^3$$

Como se puede observar, en comparación con la nivelación del área A₁, la segunda nivelación resulta mucho mayor en lo que respecta a la cantidad de tierra que se necesita remover y mover, y esto conlleva a muchos mayores costos para realizarse, también la relación de corte y relleno resulta mucho mayor a la aceptable. Por estas razones no se considera adecuada ni aconsejable la nivelación del terreno A₂ para un diseño de riego por gravedad. Para efectos de diseño, solo se utilizará el área A₁.

5.4. Obtención de las muestras de suelo y pruebas de infiltración

Los lugares de donde se obtuvieron las muestras de suelo (disturbadas e indisturbadas) y donde se realizaron las pruebas de infiltración, todo esto se muestra a continuación, en el plano de la figura 5.11.

La nomenclatura utilizada en la figura 5.11 se muestra en el siguiente cuadro 5.7:

Cuadro 5. 7 Nomenclatura utilizada en el plano topográfico de la figura 5.11

Nomenclatura	Comentario
+	Punto que indica la zona donde se realizó el evento
INFLNo.1	Prueba de infiltración número 1
INFLNo.2	Prueba de infiltración número 2
INFLNo.3	Prueba de infiltración número 3
INFLNo.4	Prueba de infiltración número 4
RECOL1	Recolección de las muestras disturbadas e indisturbadas del área 1
RECOL2	Recolección de las muestras disturbadas e indisturbadas del área 2

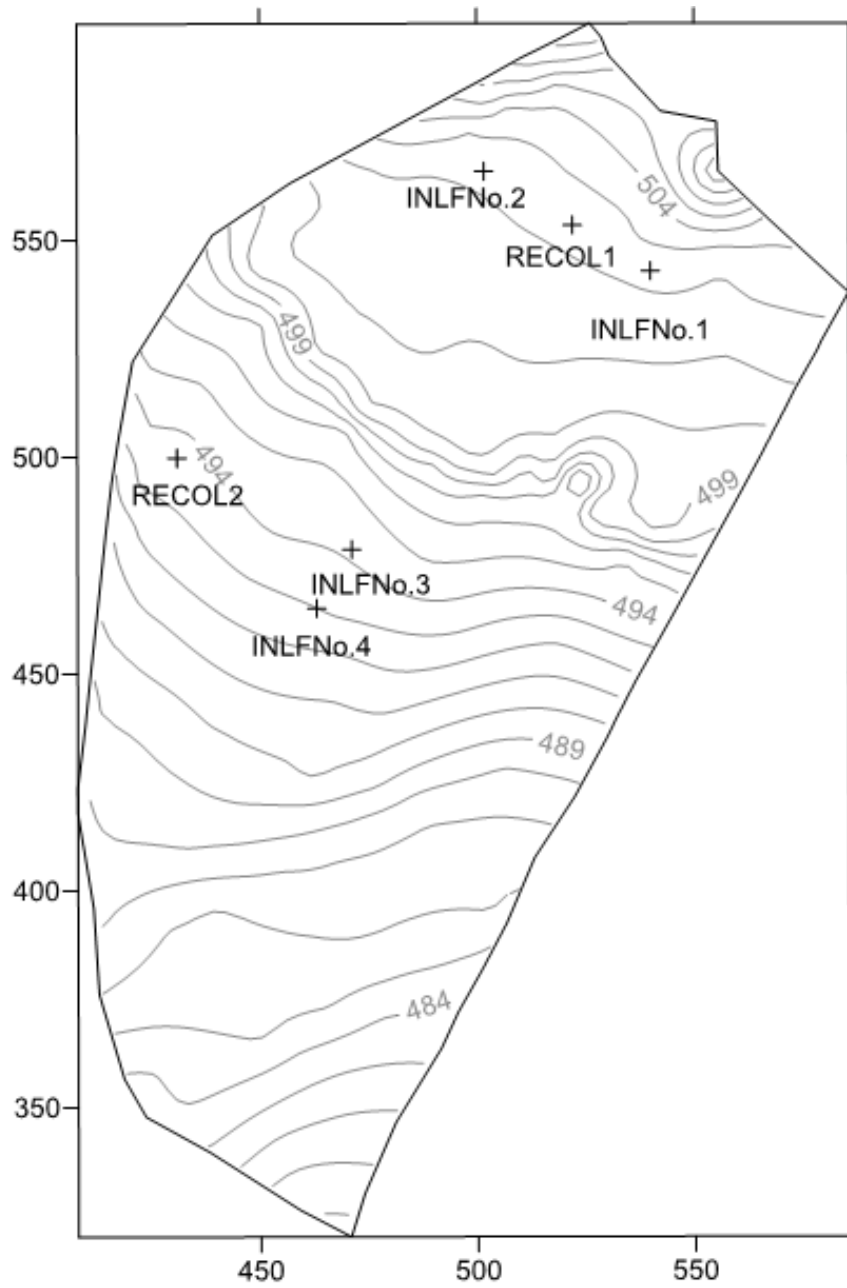


Figura 5. 11 Plano topográfico que indica los sitios donde se recolectaron las muestras de suelo y donde se realizaron las pruebas de infiltración

5.5. Granulometría y contenidos de humedad del suelo.

Luego de poder observar lo realizado en el laboratorio de suelos, se procede a mostrar los resultados obtenidos de todas las pruebas de laboratorio mencionadas en la metodología de este trabajo:

Cuadro 5. 8 Análisis físico de los suelos del terreno A₁

Parámetros	Profundidades		
	0-20 cm	20-40 cm	40-75 cm
Arcilla (%)	56,20	46,20	81,56
Arena (%)	26,60	30,30	7,80
Limo (%)	17,20	23,50	10,64
Textura	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso
Pe (g/cm ³)	1,14	1,11	1,11
CC (%)	48,69	40,79	50,52
PMP (%)	46,09	39,80	49,22
Agua útil (%)	2,60	0,99	1,30

Cuadro 5. 9 Análisis físico de los suelos del terreno A₂

Parámetros	Profundidades		
	0-20 cm	20-40 cm	40-75 cm
Arcilla (%)	49,45	49,45	66,95
Arena (%)	27,05	30,30	17,05
Limo (%)	23,50	20,25	16,00
Textura	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso
Pe (g/cm ³)	1,13	1,11	1,13
CC (%)	43,60	42,38	47,63
PMP (%)	40,77	40,83	45,79
Agua útil (%)	2,83	1,55	1,84

Luego de observar los cuadros 5.8 y 5.9, se puede ver que la totalidad del terreno muestra características similares en cuanto a las características físicas del suelo tales como textura, peso específico aparente y los coeficientes hídricos del suelo.

Se obtienen suelos de textura arcillosa, con un alto contenido de arcilla en el último estrato (40-75 cm) de 81,56 %.

Se dieron porcentajes de agua útil o aprovechable por la planta muy bajos, los cuales no superan el 3 % de agua en ningún estrato. Los valores de porcentaje de agua útil que se tienen son muy diferentes a los valores de rangos propuestos por Grassi (1987) en el cuadro 3.3, los cuales abarcan para suelo arcilloso de 16 a 20 %, mientras que con respecto a los valores presentados en el cuadro 3.4 mencionado por Cisneros (2003), para suelo arcilloso es de 7,9 %. Tal y como se pudo observar, los valores obtenidos en el laboratorio para este trabajo están muy alejados de estos.

El haber encontrado estos valores de humedad presentes en el suelo, puede dar lugar a que se esté en presencia de un suelo de características vérticas con arcillas expansibles.

Según investigadores argentinos este tipo de suelos:

“pueden ser muy productivos pero con restricciones para el manejo cuando están húmedos, con bajas tasas de infiltración y conductividad hidráulica, resultando ser susceptibles a la erosión y al escurrimiento. Presentan pobre aeración, se vuelven muy adhesivos y el exceso de agua en el suelo dificulta las operaciones de labranza, siembra y cosecha, como así también el tráfico de implementos agrícolas. Sin embargo, cuando están secos se vuelven muy densos y duros, con altas tasas de infiltración debido a la presencia de grietas que pueden ser muy importantes en ancho y profundidad.”(Wilson y Cerana 2004:1).

Experiencias indican que en este tipo de suelos, para determinaciones a altas succiones sobre ollas de presión es necesaria la permanencia de las muestras durante el ensayo un tiempo prolongado, en algunos casos hasta 20 días (Grantón, *et al* 1998).

También dicen Wilson y Cerana (2004:6) que: ***“cuando las muestras se obtienen en suelo seco, una vez que se saturan para llevarlas a la olla de presión, el material se expande y sobrepasa notoriamente la superficie del anillo metálico. Finalmente, al producirse la succión, existe una pérdida en la continuidad del sistema de poros, manteniéndose con mayor cantidad de agua la porción superior de la muestra de suelo y dando por lo tanto valores erróneos y más altos de contenido hídrico del suelo.”***

Por lo tanto y por efecto del cambio volumétrico, según los anteriores autores, se recomienda realizar el muestreo en condiciones de suelo cercanos a capacidad de campo.

Debido a alguna inconsistencia anteriormente mencionada y la obtención de las muestras con condiciones de suelo adversas a las recomendadas, se pudo haber causado el error en la forma en que se obtuvieron los valores en este estudio y por esta razón, para el cálculo de las humedades a CC y PMP se realizó mediante el método empírico a través de fórmulas.

Primero mediante la ecuación 3.13 se calculó el valor del CC por medio de los contenidos de arcilla, limo y arena, mientras que para el valor de PMP se utilizó el promedio de los valores dados por las ecuaciones 3.15 y 3.16. Para este caso, se utilizó la ecuación 3.15 porque se puede usar sin importar la textura del suelo, y la 3.16 es tomando en cuenta la textura del suelo. Los resultados se muestran en el cuadro 5.10:

Cuadro 5. 10 Resultados de CC y PMP obtenido mediante las ecuaciones 3.13, y el promedio entre los valores dados por las ecuaciones 3.15 y 3.16; y otros datos de interés

Parámetros	Profundidades		
	0-20 cm	20-40 cm	40-75 cm
Arcilla (%)	56,2	46,2	81,56
Arena (%)	26,6	30,3	7,8
Limo (%)	17,2	23,5	10,64
Textura	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso
Pe (g/cm ³)	1,14	1,11	1,11
CC (%)	42,11	37,71	55,47
PMP (%)	21,42	19,24	28,03
Agua útil (%)	20,69	18,46	27,44

Como se observa en el cuadro 5.10, las ecuaciones aplicadas para obtener los coeficientes hídricos CC y PMP, nos arrojan valores mucho más cercanos a los valores que tiene un suelo de estas características en la realidad, y por lo tanto serán los que se tomarán en cuenta a la hora de realizar el diseño.

5.6. Pruebas de infiltración

Las pruebas de infiltración se realizaron en los dos terrenos, en la primer área A₁ se realizaron dos repeticiones y en la segunda área también. Estas pruebas fueron realizadas entre a principios de Marzo (INFLNo.1) y a finales de Abril (INFLNo.2) y sus resultados pueden verse en los anexos 5 y 6.

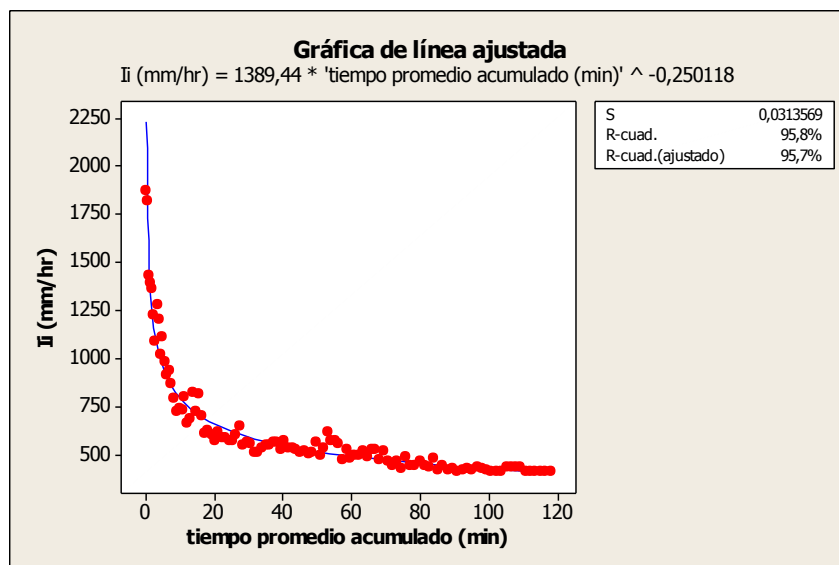
Para la segunda área debido a que no se trabajará en ella, no se muestran las pruebas realizadas en el terreno, sin embargo pueden ser vistas en la sección de Anexos: Anexo 8 y 9.

5.6.1. Prueba de infiltración para el terreno A₁

Estas pruebas son las claramente marcadas y nombradas en el plano topográfico de la figura 5.11, como INFLNo.1 y INFLNo.2.

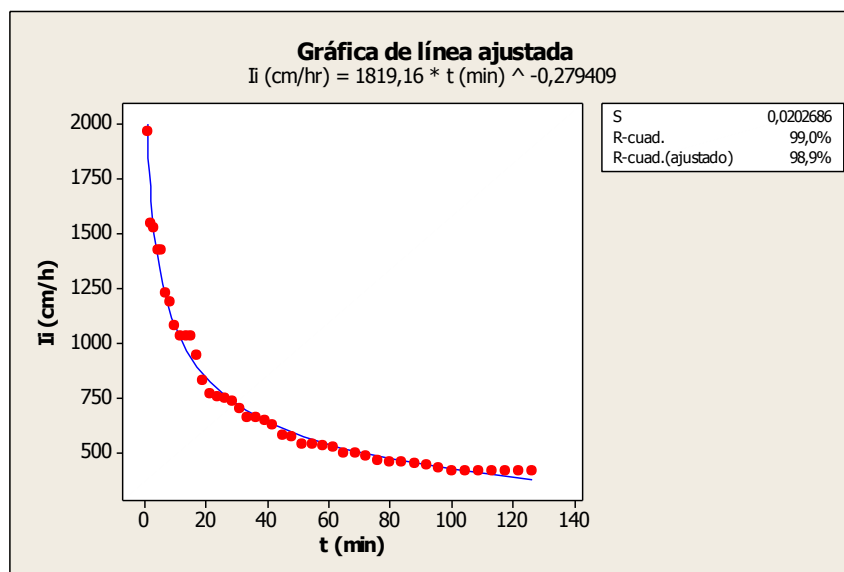
Según los datos obtenidos de la prueba de infiltración, mostrados en los anexos 5 y 6, y el procedimiento descrito en el punto 3.6.4 para obtener la gráfica y ecuación de Kostiakov, se

obtuvo las siguientes figuras (5.12 y 5.13), las cuales representan las curvas potenciales de la infiltración instantánea de los cuadros anteriormente nombrados respectivamente:



Minitab 16

Figura 5. 12 Gráfica de la curva potencial de la prueba de infiltración N°1 (INFLNo.1), terreno A₁



Minitab 16

Figura 5. 13 Gráfica de la curva potencial de la prueba de infiltración N°2 (INFLNo2), terreno A₁

Para la gráfica obtenida de la prueba N°1, se obtuvo el coeficiente de correlación R de la siguiente manera:

$$R = \sqrt{R - \text{cuad}} = \sqrt{0,958} = 0,9787 \approx 97,9 \%$$

Observando los resultados obtenidos de la prueba N°2, se obtuvo un mejor coeficiente de correlación R, aplicando la raíz cuadrada al coeficiente R-cuad de la misma manera que se realizó anteriormente, se obtiene:

$$R = \sqrt{0,99} = 0,9949 \approx 99,5 \%$$

De esta manera se puede ver, que para la prueba N°2 se obtuvo un coeficiente más cercano a 1, por lo tanto, significa que los datos que se obtuvieron para esta prueba son mucho más confiables que los otros. De este modo, tomaremos como ecuación de infiltración instantánea la que puede ser vista en la gráfica 5.13.

Teniendo esto en cuenta, uno de los datos de interés, para el cual se hicieron las pruebas de infiltración, es el valor de la infiltración básica o base del suelo, por lo tanto, aplicando la ecuación 3.7, podemos obtener este valor. Dicho esto, partiendo de la ecuación: $I_i = 1819,16 * t^{-0,279409}$ y transformando a la forma de la ecuación 3.7 se obtiene lo siguiente:

$$I_b(\text{mm/hr}) = 1819,16 * (-600 * -0,279409)^{-0,279409}$$

$$I_b(\text{mm/hr}) = 434,87 \approx 43,5 \text{ cm/hr}$$

Como se puede observar, este valor difiere notablemente de los valores característicos de velocidad de infiltración básica para un suelo arcilloso, para el cual, según experiencias y estudios, se hablan que deben de rondar desde menos de 0,1 – 2,5 cm/hr (Booher 1974), o inclusive de 0,1- 0,5 cm/hr (Brouwer; *et al*, citado por Villalobos 2008). Cisneros (2003) también habla de valores que van desde 0,1 hasta 0,8 cm/h.

Haber obtenido estos valores de infiltración en las pruebas realizadas, no quiere decir que las pruebas hayan sido realizadas erróneamente, y más aun teniendo en cuenta el grado de complejidad que puede tener una prueba de infiltración, las cuales son sumamente simples.

Lo que realmente pasó, es que otros factores entraron el juego a la hora de realizarse la infiltración en el agua. Dentro de los que se destaca el siguiente: presencia de un suelo con arcillas expandibles. Estos suelos son dados a formar grietas en la época de verano, por lo tanto el agua fluye libremente por ellas propiciando velocidades de infiltración sumamente altas y de allí la infiltración básica también resulta elevada. Este fenómeno también fue mencionado en el punto 5.5.

Según la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) este tipo de suelos: *“por sus propiedades de consistencia extrema permiten el laboreo apenas durante un corto plazo de régimen de humedad del suelo ya que se tornan pegajosos con humedad y duros en secos. El laboreo en condiciones húmedas puede resultar en que el suelo se pegue y forme terrones grandes. Las grietas anchas y profundas durante la estación seca permiten que el agua de la lluvia descienda libremente entre las grietas.”* (FAO 2014).

Por lo tanto, dicho esto, al haberse realizado las pruebas de infiltración en la época de verano y teniéndose estas características propias de este suelo antes dichas, propicia que se aumente considerablemente la infiltración del agua en el suelo debido al agua que cae sobre las grietas y por lo tanto no muestra valores característicos o normales del suelo sobre el que se trabajó, por lo que no resulta apropiado diseñar un sistema de riego con estas mediciones.

Dicho esto, para el diseño del sistema de riego por surcos y melgas, se debe de tomar un valor según otras experiencias para este tipo de suelo, tomando en cuenta su textura, la cual es el parámetro sobre el cual se han diseñado la mayoría de tablas que proponen valores obtenidos en investigaciones por diferentes autores los cuales pueden utilizarse, en caso de que no se tengan los valores reales para el suelo sobre el cual se va a trabajar.

De esta manera, para efectos del diseño se procederá a realizar un promedio de los rangos de valores propuestos por algunos autores, el cálculo se muestra a continuación:

Según Booher:

$$Ib = \frac{0,1 + 2,5}{2} = 1,3 \text{ cm/hr}$$

Según Brouwer:

$$Ib = \frac{0,1 + 0,5}{2} = 0,3 \text{ cm/hr}$$

Según Cisneros:

$$Ib = \frac{0,1 + 0,8}{2} = 0,45 \text{ cm/hr}$$

De las anteriores opiniones, la de Booher es la que más alcance tiene ya que abarca un rango más extenso de valores, sin embargo también se tomará en cuenta los intervalos reducidos de las otras dos opiniones, por lo tanto finalmente se tiene el siguiente valor de infiltración básica:

$$Ib = \frac{1,3 + 0,3 + 0,45}{3} = 0,7 \text{ cm/hr}$$

Éste último será el valor que se utilizará para los diseños de riego por surcos y melgas.

5.6.2. Pruebas de infiltración para el terreno A₂

Se realizaron las pruebas de infiltración de esta área, para tener mayor cantidad de valores y corroborar resultados de velocidades de infiltración e infiltraciones básicas, las cuales se obtuvieron resultados similares a los del área A₁, por lo tanto se considera que las 4 pruebas realizadas en los dos terrenos se realizaron de manera correcta.

Las pruebas realizadas en este terreno se encuentran en la sección de Anexos. Se decidió no incluirlas en este apartado debido a las consideraciones tomadas anteriormente, y también primordialmente debido a que ésta área no va a ser de utilidad para el caso de este proyecto.

5.7. Diseño de los sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros

5.7.1. Criterios generales para diseño

A continuación se explican los criterios que se siguieron para elegir cada parámetro importante para un diseño de riego y consecuentemente calcular la lámina de riego a aplicar o dosis de riego.

Para el diseño de los sistemas de riego se siguió un orden lógico correspondiente a la metodología explicada en el trabajo, paso a paso. Sin embargo, antes de diseñar se calculó la dosis de riego, es decir la lámina neta de riego, la cual será de utilidad para los tres métodos de riego. También como criterio importante, se recuerda que solo se diseñarán los sistemas de riego para el área A_1 por las razones anteriormente explicadas.

De ahora en adelante se hablará del cultivo de maíz como el cultivo que se eligió para el diseño, ya que del cultivo dependen ciertos parámetros como lo son: el agotamiento permisible, la profundidad de raíces, coeficiente de cultivo, entre otros.

Para el cálculo de la lámina neta primero se eligió un agotamiento permisible (A_g), también visto en la teoría como nivel de agotamiento permisible (NAP) según Doorembos y Kassam (1979). Keller y Bliesner (1990) recomiendan un valor de agotamiento permisible de 50% para el caso del cultivo de maíz, y Grassi (1987) también lo recomienda solo que este último lo sugiere para cualquier diseño que se vaya a realizar sin importar el cultivo, por lo tanto el valor que entrará en la ecuación para obtener la lámina neta será de 0,50.

Con respecto a la profundidad de las raíces que se tomará en cuenta para el diseño, basado en experiencias de Thornthwaite y Mather (1957) se tomará como profundidad de raíces igual a 50 cm, tomando en cuenta de que se hablará de la extensión de éstas sobre un suelo arcilloso para el cultivo de maíz.

Algunos datos útiles para el cálculo de la lámina neta fueron tomados del cuadro 5.10, y son los siguientes:

Cuadro 5. 11 Datos necesarios para el cálculo de láminas de agua

Parámetros	Profundidades		
	0-20 cm	20-40 cm	*40-75 cm
Pe (g/cm ³)	1,14	1,11	1,11
CC (%)	42,11	37,71	55,47
PMP (%)	21,42	19,24	28,03
Agua útil (%)	20,69	18,46	27,44

*Solo serán utilizados 10 cm de ésta capa o estrato de suelo, por las razones explicadas anteriormente.

Según la fórmula 3.19; para el cálculo de la lámina máxima retenida en el suelo, en el primer estrato (0-20 cm) se tendría:

$$Lm = \frac{CC - PMP}{100} * P_e * prof$$

$$Lm = \frac{42,11 - 21,42}{100} * 1,14 * 20 = 4,72 \text{ cm}$$

Siguiendo el anterior proceso, resulta el siguiente cuadro 5.12:

Cuadro 5. 12 Valores de láminas máximas por cada estrato de suelo

Parámetros	Profundidades		
	0-20 cm	20-40 cm	40-75 cm **
Pe (g/cm ³)	1,14	1,11	1,11
CC (%)	42,11	37,71	55,47
PMP (%)	21,42	19,24	28,03
Agua útil (%)	20,69	18,46	27,44
Lámina máxima almacenada (cm) *	4,72	4,10	3,05

*Lámina máxima almacenada = Lm

** Recordar que solo fueron utilizados 10 cm de ésta capa o estrato de suelo, por las razones explicadas anteriormente.

Por medio de la ecuación 3.20 se calcula lámina neta a aplicar; la cual es igual a multiplicar el valor de la lámina máxima (Lm) por el valor de agotamiento permisible; de lo anterior resulta lo siguiente:

$$Ln = Lm * Ag$$

Al substituir el valor del agotamiento permisible resulta la siguiente expresión:

$$Ln = Lm * 0,50$$

Por medio de esta ecuación, utilizando como valor de lámina máxima la sumatoria de las láminas máximas de cada perfil, se obtuvo los siguientes resultados:

Cuadro 5. 13 Valores de lámina máxima y lámina neta total

Láminas	Profundidades		
	0-20 cm	20-40 cm	40-75 cm
Lámina máxima por estrato (Lm) (cm)	4,72	4,10	3,05
Lámina máxima total $\sum Lm$ (cm)	11,87		
Lámina neta a aplicar $\sum(LmxAg)$ (cm)*	5,94		

*Lámina neta a aplicar = Lámina máxima total x Agotamiento permisible = 11,87*0,5

Por lo tanto, como se muestra en el anterior cuadro 5.13, la lámina neta a aplicar es de 5,94 cm. Este valor será el utilizado para los sistemas de riego por surcos y melgas ya que para riego por cuadros se establecerá otro cultivo. También se debe de recordar que luego de calcular la evapotranspiración del cultivo y calcular la frecuencia de riego, la lámina neta debe de recalcularse mediante la fórmula 3.22, sin embargo esto se verá reflejado en el procedimiento para el diseño de riego por cada método.

5.7.2. Capacidad del reservorio de donde se tomará el agua.

Según la Escuela de Ingeniería en Agronegocios, el reservorio del cual se tomará el agua para este proyecto, tiene una capacidad de almacenamiento de 1200 m³.

5.7.3. Cálculo de la evapotranspiración real del cultivo

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial y real por medio del método de Hargreaves, se utilizarán los coeficientes de cultivo promedios del cuadro 3.8. Y se tomará como cultivo de referencia el maíz de grano, teniendo un ciclo vegetativo de 5 meses aproximadamente. Teniendo así en Enero y Febrero la etapa inicial, Marzo y Abril la etapa intermedia o de desarrollo, y la etapa final o de cosecha en Mayo. Cabe destacar que los meses

del año restantes se consideran como estación lluviosa por lo que no se utilizarán en el cálculo de la evapotranspiración.

Los valores de evapotranspiración potencial fueron obtenidos mediante la ecuación 3.27, mientras que los resultados obtenidos de evapotranspiración real fueron obtenidos mediante la ecuación 3.26 utilizando los valores promedios de Kc propuestos en el cuadro 3.7, ya que se utilizó el método de Hargreaves. También para obtener la radiación extraterrestre se utilizó el cuadro del Anexo 4, entrando con 10° del Hemisferio Norte, según la localización de la estación del IMN.

Los resultados relacionados con evapotranspiración obtenidos mediante el método de Hargreaves, se encuentran a continuación:

Cuadro 5. 14 Valores de coeficiente del cultivo, evapotranspiración potencial y real, obtenidos por la fórmula de Hargreaves

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
T _{min} /día °C	13,4	13,4	13,8	14,8	16
T _{max} /día °C	21,8	22,7	23,5	24,5	25
t _{med} °C	17,6	18,1	18,7	19,7	20,5
Kc	0,35	0,35	1,125	1,125	0,475
R _o (mm/día)	13,2	14,2	15,3	15,7	15,3
ET _o (mm/día)	3,113	3,574	3,998	4,215	4,052
ET _r (mm/día)	1,089	1,251	4,498	4,742	1,925

Cabe decir que los valores de temperaturas fueron obtenidas del Anexo 7, facilitado por el Instituto Meteorológico Nacional.

Para determinar el valor de la evapotranspiración real que se utilizará para el diseño de los sistemas de riego, ésta se determinará de acuerdo al balance hídrico mensual, y para ellos se calculará el déficit de agua para cada período.

Por medio de las ecuaciones 3.29 y 3.30, las cuales son las siguientes, se calculó la precipitación efectiva (PE):

$$PE = 0,8 * P - 25, \text{ si } P > 75 \text{ mm/mes}$$

$$PE = 0,6 * P - 10, \text{ si } P < 75 \text{ mm/mes}$$

También mediante la ecuación 3.32 se obtuvo el déficit de agua mensualmente (Df). Los resultados obtenidos se pueden observar en el siguiente cuadro 5.15.

Cuadro 5. 15 Déficits mensuales, de los meses tomados en cuenta para el ciclo del maíz de grano

Mes	P _{mensual} (mm)*	PE (mm)	Etr _{mensual} (mm)	Df (mm)
Enero	64,9	28,9	33,8	-4,9
Febrero	40,7	14,4	35,1	-20,7
Marzo	23,9	4,3	139,4	-135,1
Abril	38,1	12,9	142,3	-129,4
Mayo	179,7	118,78	59,7	59,1

*P_{mensual} = Precipitación mensual (obtenida del Anexo 7)

Como se puede observar, el mes con mayor déficit de agua corresponde al mes de marzo, por lo tanto corresponde al mes más crítico, con base a esto se procede a elegir la evapotranspiración real de diseño; la cual para este caso corresponderá a la proveniente de ese mismo mes, la cual según el cuadro 5.14, es de 4,498 mm/día. Esta evapotranspiración será la utilizada para los diseños de riego por surcos y melgas.

5.7.4. Distribución de los sistemas.

Debido a la longitud del área para regadío que se utilizará, se ha decidido subdividir tal área en 3 secciones, para así incorporar los 3 sistemas de riego, determinando así que para riego por surcos se usará un área equivalente a 2037,75 m² (28,5 m x 70,5 m), para riego por melgas se utilizarán 2115 m² (33 m x 70,5 m), mientras que para riego por cuadros se tendrá menos de la quinta parte del terreno, equivalente a 715 m² (10 m x 70,5 m). Se dejó un metro al final de los 70,5 metros, para construir un canal de desagüe.

En la siguiente figura 5.14 se puede observar la distribución que se le dará al riego:

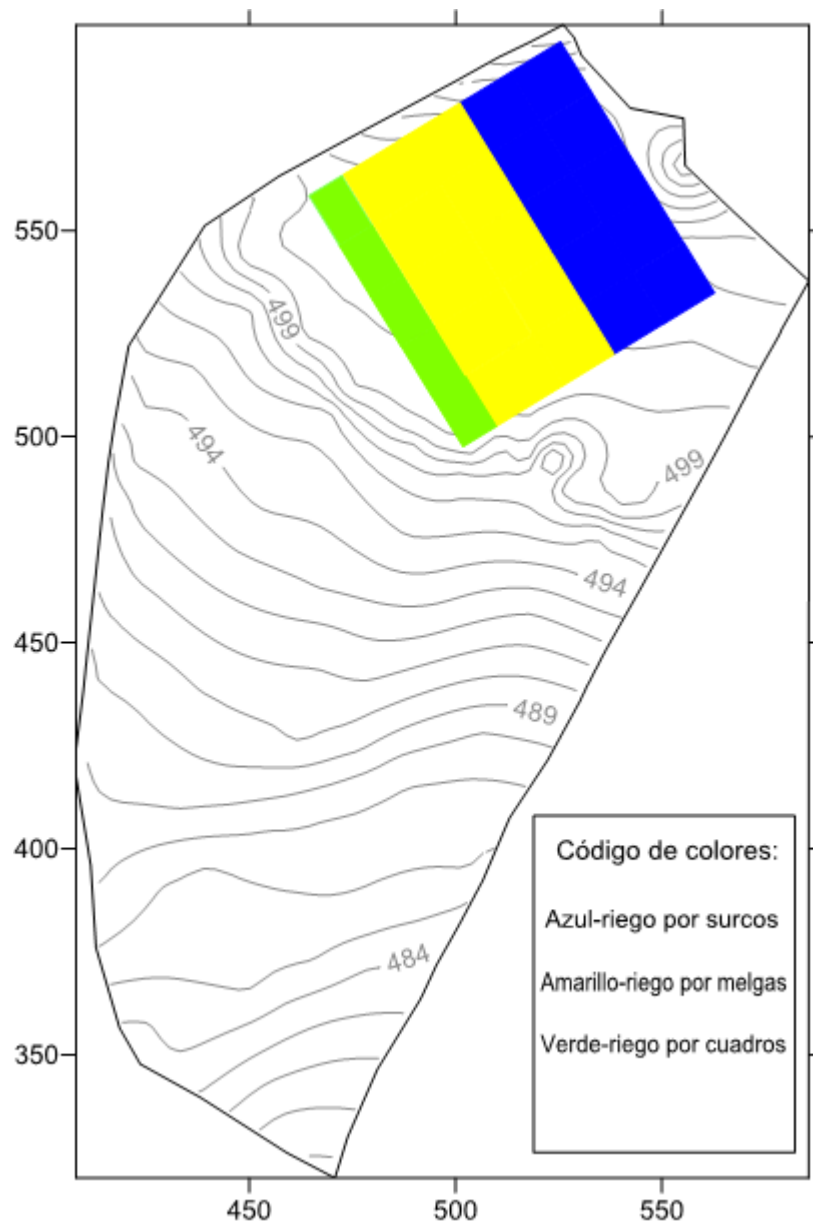


Figura 5. 14 Plano de las áreas de riego

5.7.5. Diseño de sistema de riego por surcos

a) Orientación de los surcos

Como se realizó movimiento de tierras para tener unas pendientes aptas para riego por gravedad, del 1,5% de norte-sur y 2% de oeste-este, se podría escoger cualquiera de las dos. Pero para efectos de este diseño, se diseñará con una orientación Oeste-Este, la cual corresponde a la mayor pendiente, y también tomando en cuenta donde va a estar colocada la fuente de agua, la cual será riego con mangas plásticas, las cuales son tubería de PVC a cual tiene aberturas a una separación deseada, por donde saldrá el caudal deseado.

También llevará esta orientación con el propósito de evitar que las líneas se provoquen sombra entre sí.

b) Separación entre surcos

Se nombraron diferentes fórmulas para el cálculo de la separación entre los surcos, pero no se usarán para este caso, debido a que por efectos prácticos se usará la distancia de siembra que tiene la sembradora utilizada en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, la cual equivale a 0,8 m.

c) Cálculo de la frecuencia de riego (Fr)

Anteriormente se calculó la lámina de riego neta (L_n), la cual es de 59,4 mm, y la evapotranspiración real del cultivo que se usará para los diseños de riego por surcos y melgas será la de 4,498 mm/día por las razones explicadas en el punto 5.7.3.

Tomando esto en cuenta, aplicando la ecuación 3.21 se obtiene lo siguiente:

$$Fr = \frac{59,4 \text{ mm}}{4,498 \text{ mm/día}} = 13,21 \text{ días}$$

El cual se redondeará a 13 días. Luego de determinar la frecuencia de riego se procede a recalcular la lámina neta de riego, la cual sería la siguiente:

$$Ln_c = 4,498 \text{ mm/día} * 13 \text{ días} = 58,47 \approx 58,5 \text{ mm}$$

Esto significaría que habría que regar el terreno cada riego distanciado de otro cada 13 días. De ahora en adelante para el caso de cualquier sistema del presente proyecto se utiliza la lámina neta corregida anteriormente obtenida (58,5 mm).

d) Lámina de riego bruta (Lb)

Para encontrar la eficiencia de riego en surcos, se usará el cuadro 3.9, el cual corresponde a los valores de eficiencias en riego por surcos de acuerdo a la pendiente que se tenga. Según este cuadro, para una pendiente de 2 % se obtiene una eficiencia de 55%, por lo tanto utilizando la ecuación 3.25 se tiene:

$$Lb = \frac{58,5 \text{ mm}}{0,55} \approx 106,4 \text{ mm} = 10,64 \text{ cm}$$

e) Longitud de los surcos (L)

Utilizando el anexo 3 y entrando con la pendiente de surcos de 2% y una lámina bruta de 10 cm se obtienen surcos con una longitud máxima de 144 m. Pero según el área que se planea adecuar, se pueden formar surcos de hasta 70,5 metros; lo que corresponde a que esta será la longitud de los surcos inicialmente.

f) Caudal máximo no erosivo (Qmáx)

Primero se obtendrá el Qmáx por medio de los cuatro métodos explicados anteriormente para el cálculo de éste caudal; y luego se procederá a asignar el Qmáx que se utilizará como caudal máximo de diseño.

Método de Criddle

De acuerdo a la ecuación sugerida por Criddle et al (1965), se tiene lo siguiente:

$$Qmáx = \frac{38}{2} = 19 \text{ L/min}$$

Método del SCS

Según la ecuación dada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, primero se supone las dimensiones de los surcos. Un surco sobre suelo arcilloso, se puede construir de forma trapezoidal o inclusive triangular, de estas 2 la que requiere menos trabajo y por lo tanto menos costos, corresponde a la triangular, para este caso se diseñarán de esta manera. Dicho esto se tiene así lo siguiente:

- Se supone un espejo de agua de 25 cm y una profundidad de 10 cm

$$A = \frac{T * H}{2} = \frac{0,25 * 0,10}{2} = 0,0125 \text{ m}^2$$

- Luego de calcular el área hidráulica se procede a hacer uso de la ecuación antes mencionada, la 3.32, resultado así:

$$Q_{\text{máx}} = 3055,6 * 0,0125 = 38,19 \text{ L/min}$$

Método de Gardner

De acuerdo a la ecuación propuesta por Gardner, se deben de utilizar los coeficientes del cuadro 3.9, los cuales serían para este caso, $C = 0,892$ y $a = 0,937$ y se obtiene lo siguiente:

$$Q_{\text{máx}} = 60 * \frac{0,892}{2^{0,937}} = 27,95 \text{ L/min}$$

Método en base a tabla

Por último, de acuerdo al Anexo 3 entrando con una pendiente de 2%, se obtiene un caudal máximo no erosivo de 0,32 L/s, el cual es igual a 19,2 L/min

Caudal máximo no erosivo de diseño

Como de los anteriores métodos, cada uno relaciona características diferentes del suelo como por ejemplo el método de Criddle y el de en base al Anexo 3 los cuales se relacionan con la pendiente, mientras que los métodos de Gardner y SCS, el primero se relaciona con el área hidráulica del surco y el otro por medio de la textura del suelo; para reunir todas las

características propias de cada método se elegirá como caudal máximo no erosivo, el promedio de los 4 métodos calculados.

Así se tendrá lo siguiente:

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{19 + 38,19 + 27,95 + 19,2}{4} = 26,085 \text{ L/min}$$

De esta manera, el caudal máximo no erosivo que se utilizará en el diseño, será el calculado el cual es de 26,085 L/min.

Cabe destacar que para obtener mayor exactitud a la hora de determinar el caudal máximo no erosivo que se tiene que aplicar en la primera etapa, se recomienda realizar la prueba de avance de agua en surcos en la cual se fijan diferentes caudales mayores y menores que los obtenidos por los métodos de Cridle, el SCS, Gardner y en base al anexo 3 del presente trabajo. Dicha prueba se puede encontrar detalladamente explicada en Villalobos (2008:68-72).

Sin embargo, en este trabajo no se realizaron pruebas de campo debido al hecho de que no se contaba con ningún surco en el terreno con la nivelación propuesta en el diseño.

g) Cálculo del caudal de infiltración (Q_{inf})

Antes de obtener el caudal de infiltración mediante la ecuación 3.41, se debe de calcular la infiltración promedio, la cual para nuestro caso se calculará multiplicando la infiltración base deducida anteriormente por un factor “f” tomado del cuadro 3.13.

Según la textura del suelo arcilloso, que corresponde a textura fina, se define un factor f de 1,5. Dicho esto se realiza la siguiente operación y se obtiene la velocidad de infiltración promedio (V_{ip}):

$$V_{ip} = 1,5 * 0,7 \text{ cm/hr} = 1,05 \text{ cm/hr}$$

Teniendo este valor, se utiliza la ecuación 3.41, y el caudal de infiltración resulta así:

$$Q_{inf1} = 0,167 * 1,05 * 0,8 * 70,5 = 9,8897 \text{ L/min}$$

Luego, tomando en cuenta la ecuación 3.43, la cual parte del principio de que puede tomarse el caudal de infiltración como la mitad del caudal de avance, se tiene lo siguiente:

$$Q_{inf2} = \frac{26,085}{2} = 13,04 \text{ L/min}$$

Como los resultados obtenidos de caudal de infiltración son similares, se tomará como valor final de caudal de infiltración un promedio entre los dos valores obtenidos.

$$Q_{inf} = \frac{9,8897 + 13,04}{2} = 11,46 \text{ L/min}$$

Se recomienda el realizar el método de surco infiltrómetro (Bondurant 1957) mencionado en este trabajo; para obtener el caudal que va a satisfacer la velocidad de infiltración. Sin embargo como ya fue explicado, no se contó con surcos para este proyecto por lo que tampoco se pudo realizar dicha prueba.

El procedimiento del surco infiltrómetro o prueba de infiltración en surcos al igual que el método de prueba de avance de agua en surcos, puede ser estudiado en Villalobos (2008:72-76).

h) Cálculo del tiempo de infiltración (Ti)

Mediante la ecuación 3.44 se obtiene el tiempo de infiltración, para el cual se utiliza la lámina bruta y el valor de infiltración promedio calculado en el punto (g).

Así se tiene la siguiente expresión:

$$Ti = \frac{106,4 \text{ mm}}{10,5 \text{ mm/hr}} = 10,13 \text{ horas}$$

El tiempo que se tarda mientras se aplica el caudal de infiltración de 11,46 L/min será de 10 horas y 8 minutos.

i) Cálculo del tiempo de avance (Ta)

Como se definió que el tiempo de avance se tomará como la cuarta parte del tiempo de infiltración, se tiene lo siguiente:

$$Ta = \frac{10,13 \text{ horas}}{4} = 2,53 \text{ horas}$$

Esto significa que el tiempo que tienen que transcurrir el caudal máximo no erosivo de 26,085 L/min sobre los surcos en la primera etapa de riego, es durante 2 horas y 32 minutos.

j) Cálculo del tiempo total de riego (Tt)

El tiempo total resulta de sumar los tiempos de riegos anteriores, los cuales serían los 10,13 horas y las 2,53 restantes, dando así lugar a un tiempo de riego total de 12,66 horas, es decir, un poco más de medio día regando.

k) Surcos regados a la vez en la primera etapa (N)

Este parámetro está relacionado con el caudal que provee la fuente de agua de donde tomaremos el agua, para ello se tiene primero que hablar acerca del reservorio de donde se tomará el agua.

Capacidad del reservorio y necesidades de agua para riego

Según la Escuela de Ingeniería en Agronegocios el reservorio del cual se tomará el agua para este proyecto, tiene una capacidad de 1200 m³. Como no se tiene el caudal que puede dar el reservorio y sí se tiene el volumen, y la ecuación 3.48 está dada en función del caudal de la fuente o disponible y el caudal máximo que se le aplicará a los surcos, es decir el caudal máximo no erosivo, entonces lo que se realiza es convertir el caudal máximo (Q_{máx}) a volumen, multiplicando el Q_{máx} por el tiempo que se dura aplicando ese caudal y aplicando las debidas conversiones. Dicho proceso se muestra a continuación:

$$V_{Q_{máx}} = 26,085 \frac{L}{min} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * 2,53 \text{ h} \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 3,96 \text{ m}^3$$

De esta manera, se tiene que el caudal máximo no erosivo en unidades de volumen se tiene que es igual a $3,96 \text{ m}^3$. De esta manera se puede realizar la ecuación 3.47, pero antes se debe de tomar en cuenta la eficiencia de conducción del agua, la cual según Llorca (1982) es de 0,8 para canales sin revestir, y 0,9 para tuberías o canales revestidos. Para este caso como el caudal será transportado en tubería, se tomará el valor de 90 % (0,9). Se tiene así lo siguiente:

$$N = \frac{1200 \text{ m}^3 * 0,9}{3,96 \text{ m}^3} = 272 \text{ surcos}$$

Como se puede observar, con la capacidad del reservorio se podrían regar cientos más de surcos, por lo que no hay problema para este caso, ya que se planea regar solamente 35 surcos, en una distancia de 28,5 m.

También como dato importante, el volumen de agua que se ocupa para poder regar los 35 surcos con el caudal de infiltración, es de $210,38 \text{ m}^3$ y con el caudal máximo sería de $138,6 \text{ m}^3$.

Debido a que según el director de la Escuela de Ingeniería en Agronegocios, el ingeniero Randall Brenes, en verano el agua del reservorio se gasta con gran facilidad de modo que algunas veces se ha tenido que rellenar constantemente durante el trabajo en ese momento realizado, se regará de tal manera que primero se dé el riego por surcos, luego riego por melgas para terminar con el riego por cuadros.

l) Número de surcos en toda el área (Nt)

Como se dijo anteriormente, el número de surcos que se construirán sobre el terreno será igual a 35.

m) Tiempo para regar toda el área ($T_{100\%}$)

Mediante la ecuación 3.49 se calcula el tiempo para regar toda el área en días, tomando en cuenta que se dividirá la sección del sistema de riego por surcos en dos partes, una con 18 surcos mientras que la otra con 17 surcos ya que el número total de surcos es 35. También se

consideró que para riego se tienen disponibles 14 horas del día, esto para llevar a cabo el tiempo completo de riego.

Por último, se tiene el factor del tiempo total de riego, el cual es de 12,66 horas. Tendiendo así todos los valores necesarios para utilizar la ecuación 3.48, resulta así:

$$T_{100\%} = \frac{35 \text{ surcos} * 12,66 \text{ horas}}{18 \text{ surcos} * 14 \text{ horas}} = 1,76 \text{ días}$$

Lo cual como se puede observar, el tiempo que se necesita para regar toda el área sería aproximadamente de 2 días y éste tiempo es menor a la frecuencia de riego la cual es de 13 días. El sistema funcionará de la siguiente manera:

- Primero se regarán los 18 surcos con el caudal máximo no erosivo por un tiempo de 2,53 horas, lo que equivale a 2 horas y 32 minutos.
- Luego de terminada la primera etapa de los 18 primeros surcos se aplicará el caudal de infiltración a los 18 surcos primeros, el sistema funcionando durante 10,13 horas.
- Para el segundo día se tendrían las mismas operaciones aplicadas a los 18 surcos, pero esta vez para los 17 surcos restantes.
- Con este medio de operación, el sistema de riego se tendría en funcionamiento durante 25 horas y 20 minutos totales.
- Al final de la operación del sistema de riego por surcos, se tendrá un gasto de 348,98 m³ de agua del reservorio.
- En resumen se tiene: los surcos irán espaciados a 0,8 metros, sección transversal del surco triangular, profundidad de 10 cm y un espejo de agua de 25 cm. Se deja un espacio de 33 cm donde se colocará la tubería. Los surcos serán construidos en terraplén, al igual que todas las estructuras de riego y zanja de drenaje que se verán más adelante.

A modo de ejemplificar lo anteriormente dicho, a continuación se muestra la siguiente figura 5.15:

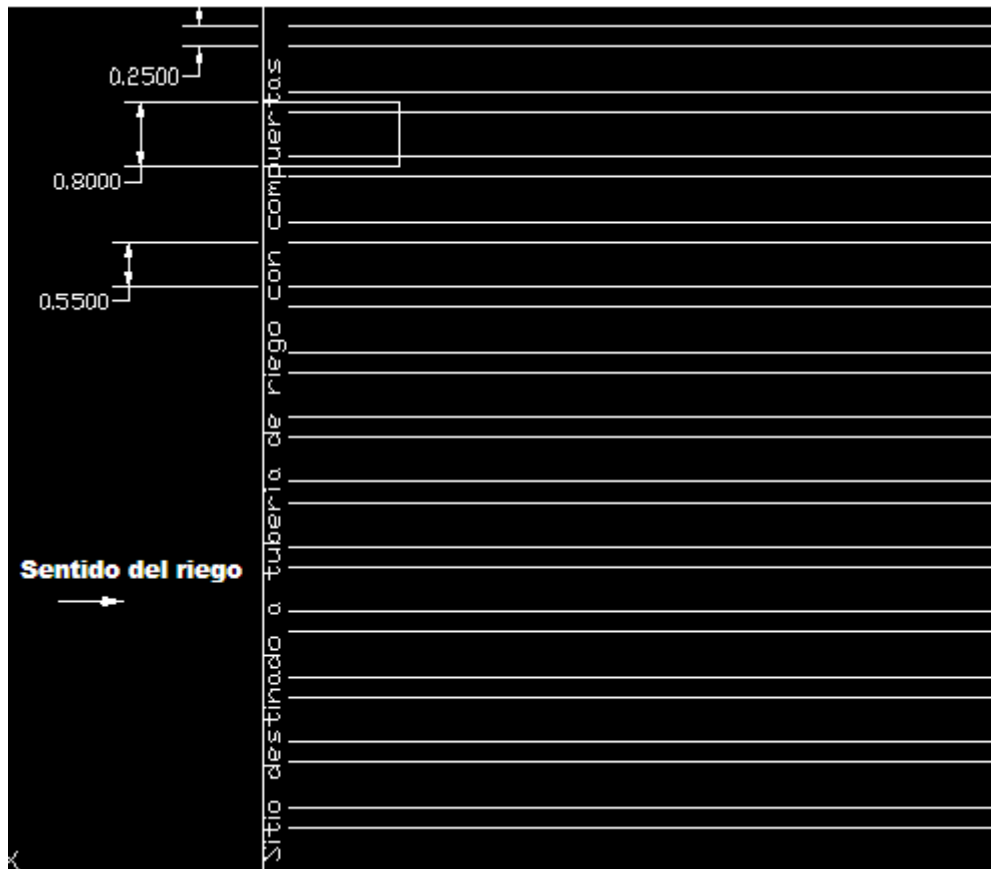


Figura 5.15 Vista detallada del sistema de riego por surcos

5.7.6. Diseño del sistema de riego por melgas

Para el diseño de las melgas se utilizará el mismo cultivo de maíz, por lo tanto se debe de tomar en cuenta que a diferencia de cultivos como el arroz, éste no es un cultivo que se caracterice por tener una densa vegetación. También se eligió el cultivo del maíz ya que anteriormente habían sido calculados algunos parámetros para el caso de éste cultivo como la lámina neta, y la evapotranspiración del cultivo; y también gracias a que no son melgas inundadas el rango de cultivos aptos para éste método se extiende.

El cultivo irá sembrado en sentido transversalmente a la dirección del flujo.

Dicho lo anterior se procede a realizar el diseño:

a) Cálculo de la lámina de riego (Ln)

Para obtener la lámina neta de riego, se realiza lo mismo que se realizó para el diseño de sistema de riego por surcos explicado en el apartado 5.7.6. paso (c), de donde se obtuvo una lámina neta corregida de 58,5 mm y una frecuencia de riego de 13 días.

b) Cálculo de la lámina bruta (Lb)

Para el cálculo de la lámina bruta de riego, primeramente se debe de obtener la eficiencia de riego, y para esto mediante el cuadro 3.13, tomando en cuenta la infiltración base equivalente a 0,7 cm/hr y la pendiente de 2%.

Tomando esto en cuenta, se obtiene una eficiencia de riego en melgas de 55%.

Utilizando la ecuación 3.25 para calcular la lámina bruta se obtiene así:

$$Lb = \frac{58,5 \text{ mm}}{0,55} \approx 106,4 \text{ mm}$$

c) Determinación del sentido de riego

Las melgas se trazarán en el sentido de Oeste a Este, según el movimiento de tierras realizado para obtener una pendiente máxima del 2% O-E; tomando como principal factor la colocación de las mangas de riego y también el criterio de diseñar en el sentido de la máxima pendiente.

d) Cálculo del ancho de la melga (W)

Para determinar el valor del ancho de la melga, se puede dar una primera aproximación con el cuadro 3.15. En el cual se recomiendan anchos mínimos y máximos para melgas, según la pendiente (S).

Según la pendiente la cual es de 2%, el cuadro 3.14 propone valores de 5 m como mínimo y 15 como máximo. Tomando en cuenta que el cultivo establecido para melgas será maíz y la distancia entre planta será de 0,8 metros, buscando aprovechar la mayor cantidad de

área y teniendo como máximo de ancho aconsejable 15 metros, partiendo de este hecho con un ancho de 15 metros se obtiene un número de hileras igual a 18,75; si redondea a 18 se obtiene un ancho de melga de 14,4 metros lo cual es aceptable según los valores sugeridos y si se redondearía a 19 el ancho sería de 15,2 metros el cual es un valor más alto del recomendado.

Es por esto que se tomará como ancho de melga un valor de 14,4 metros.

e) Cálculo del caudal (Q) por aplicar

El caudal por aplicar en L/s se obtuvo aplicando la ecuación 3.44:

$$Q = \frac{q_{or} * W * Lme}{100}$$

Pero antes y para poder calcular su valor se determinaron los siguientes parámetros:

– **Factor de corrección por pendiente (F)**

Como la pendiente es de 2% se tiene que aplicar la ecuación 3.51 para encontrar el valor de F y posteriormente multiplicarlo por el caudal unitario. Así se tiene lo siguiente:

$$F = 0,874 * 2^{-0,214} = 0,7535$$

– **Caudal unitario real (q_{or})**

Para calcular el caudal unitario real se utilizó la ecuación 3.52, y utilizando anteriormente el nomograma de la figura 3.6.

Entrando al nomograma de la figura 3.6 con una infiltración básica de 0,7 cm/hr y una lámina bruta de 106,4 mm, se obtiene aproximadamente 0,6 L/s x 100 m².

Aplicando la ecuación 3.46 se tiene:

$$q_{or} = 0,6 * 0,7535 = 0,4521 \text{ L/s} \times 100 \text{ m}^2$$

– **Longitud de la melga (Lme)**

Para el cálculo de la longitud de la melga, por medio del nomograma de la figura 3.7 se puede saber su valor máximo. Para hacer uso de este nomograma, se debe utilizar el caudal unitario real (q_{or}) y la pendiente (S).

Entrando con un caudal unitario real de $0,4521 \text{ L/s} \times 100 \text{ m}^2$ y una pendiente de 2%, se tiene que las melgas pueden alcanzar un largo de hasta 700 m como valor máximo. Sin embargo debido a las condiciones del terreno, se utilizarán los 70,5 m de la unidad de riego que fue preparada para la instalación de los métodos de riego.

Seguidamente, utilizando la ecuación 3.51 se tiene:

$$Q = \frac{0,4521 * 14,4 * 70,5}{100} = 4,5897 \text{ L/s}$$

f) Limitantes en el diseño

Luego de obtener el caudal por aplicar, también se calculó el caudal máximo no erosivo de la siguiente manera:

Para cultivos no encespedantes (ej. Alfalfa, cereales) el caudal máximo no erosivo se calculó con la ecuación 3.53 de la siguiente manera:

$$Q_{mx1} = 0,1765 * 0,02^{-0,75} = 3,32 \text{ L/s} \times m \text{ de ancho} = 33,2 \text{ L/s}$$

El caudal por aplicar a la melga debe de ser mayor al caudal mínimo, el cual se calculó con la ecuación 3.45 de la siguiente manera:

$$Q_{min} = \frac{0,00595 * 70,5 * 0,02^{0,5}}{0,25} = 0,2373 \text{ L/s} \times m \text{ de ancho} = 3,4171 \text{ L/s}$$

Donde el coeficiente de rugosidad n se tomó del cuadro 3.17, y se estableció como 0,25; suponiendo que se va a cultivar maíz de grano sembrado transversalmente a la dirección del flujo para evitar que no haya excesos de agua en el bordo inferior de la melga.

Calculados los límites dentro de los cuales debe de estar el caudal que se le debe de aplicar a cada melga, se procede a comprobar que el caudal calculado en (e) sea mayor al caudal mínimo y menor al máximo.

$$Q_{\text{máx}} > Q > Q_{\text{mín}}$$

$$33,2 \text{ L/s} > 4,5897 \text{ L/s} > 3,4171 \text{ L/s}$$

Tal y como se puede ver, el caudal de 4,5897 L/s puede ser el elegido para aplicar a la melga perfectamente, ya que cumple con lo establecido. El tener un caudal cercano al mínimo haría pensar que podría aumentarse sin rebasar al máximo permisible, aunque como se sabe, no se debe de olvidar a uno de los más importantes factores que influyen en los valores calculados mediante las fórmulas y los cuadros, el cual es la pendiente; ya que al tener pendientes elevadas hace reducir el caudal unitario real y esto reduce notoriamente el caudal a aplicar a la melga.

Para que no exista desborde de agua tanto horizontal como verticalmente a la pendiente que da la dirección del flujo (O-E), para este proyecto se aconseja trabajar con el caudal establecido.

g) Cálculo del tirante de agua en la melga (y)

El coeficiente “n” se tomó del cuadro 3.17. Mediante la ecuación 3.56 se calculó el tirante de agua en la melga donde el coeficiente n es el mismo que el tomado para la ecuación 3.55 y el caudal va en m³/s:

$$y = \left(\frac{0,0045897 * 0,25}{14,4 * 0,02^{0,5}} \right)^{3/5} = 0,011 \text{ m} = 1,1 \text{ cm}$$

Mediante este cálculo se puede observar que la altura del agua sería muy pequeña; principalmente debido al caudal que se va a aplicar ya que depende de la topografía del terreno y el cultivo que se va a utilizar, y por ende la lámina de riego bruta.

h) Cálculo del bordo de la melga (B)

Mediante la ecuación 3.51 se calculó la mínima altura que debe de tener el bordo de la melga:

$$B = 1,2 * 1,1 = 1,32 \text{ cm} \approx 1,4 \text{ cm}$$

A pesar de que la mínima altura para el bordo de la melga es un poco más de un centímetro, debido a que la pendiente transversal es fuerte (1,5%) se recomendará diseñar el bordo por lo menos de 20 cm; para que no se produzcan problemas de rebalse de agua en el bordo inferior de la melga, o sea, que el agua no se recargue sobre el bordo más bajo (Cisneros 2003).

Con respecto a la anchura del bordo, la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos recomienda anchuras variables de 50 cm hasta 2 metros (UNER 2014). Dicho esto, se tomará un valor dentro de estos dos, igual a 1,4 metros. Esto para aprovechar el bordo como un modo de paso o camino. Para elegir la anchura se tomó en cuenta que se tienen 4,2 metros a disposición (ya que los dos anchos de melga suman 28,8 metros y se tienen predispuestos 33 metros de terreno). Por lo tanto si se ocupan tres bordos (ya que serían dos melgas) se realiza lo siguiente:

$$A_{B.L} = \frac{4,2 \text{ m}}{3} = 1,4 \text{ m por cada bordo}$$

i) Cálculo del tiempo de riego por melga (TR)

Mediante la ecuación 3.52 se obtuvo el tiempo de riego, tomando en cuenta el área de la melga la cual es de 9,6 x 70,5 m. La lámina bruta es de 10,64 cm y el caudal de 3,0598 L/s.

$$TR = \frac{10,64 * (14,4 * 70,5)}{4,5897 * 360} = 6,54 \text{ horas}$$

Lo que equivale a que cada melga se le debe de aplicar el caudal durante 6 horas y 32 minutos para obtener la lámina bruta deseada en el suelo.

j) Tiempo que se dura en regar todo el campo (Tt)

Para el cálculo del tiempo de riego total se utiliza la fórmula 3.59. La cual cuenta con los siguientes valores:

- A_t = área efectiva bajo riego en ha = $28,8 \text{ m} \times 70,5 \text{ m} = 2030,4 \text{ m}^2 = 0,2030 \text{ ha}$
- T_r = tiempo de riego por melga en horas = 6,54 horas
- L, W = la longitud y el ancho de la melga, respectivamente, y están expresados en m = 70,5 m y 14,4 m respectivamente
- N = número de melgas que se riegan en forma simultánea = una
- H = es el número de horas efectivas de riego al día = 14 horas

Con los anteriores valores se tiene así el siguiente resultado, utilizando la ecuación 3.60:

$$Tt = \frac{10000 * 0,2030 * 6,54}{14,4 * 70,5 * 1 * 14} = 0,93 \text{ días}$$

Según el resultado en aproximadamente un día se riega todo el campo donde se encuentran las melgas. Realmente se puede aplicar el riego a la primera melga 6,54 horas y luego se regaría la segunda melga las 6,54 horas.

Recordando, se tiene que el volumen del reservorio es de 1200 m^3 , y el caudal aplicado por melga es de 4,5897 L/s. Con este último dato se procede a convertirlo a volumen para comparar con el que se tiene en el reservorio. Se tiene así:

$$V_{Q/melga} = 4,5897 \frac{L}{s} * \frac{60 s}{1 min} * \frac{60 min}{1 h} * 6,54 h \frac{1 m^3}{1000 L} = 108,0598 m^3$$

Si se habla de aplicar un volumen de $108,0598 \text{ m}^3$ a las 2 melgas significaría que se necesita sobre el campo de riego por melgas un volumen de agua igual a $216,12 \text{ m}^3$.

Ya que se consideró aplicar el riego de las melgas luego de haber realizado el riego por surcos, el cual para el final de la operación debió de haber quedado en el reservorio, una reserva de agua de $851,02 \text{ m}^3$, se considera que sería posible de regar instantáneamente,

debido a que todavía quedan $851,02 \text{ m}^3$ y de los cuales solo se necesitan $216,12 \text{ m}^3$. Sobrando para regar el área donde se encuentran instalados los cuadros $634,9 \text{ m}^3$.

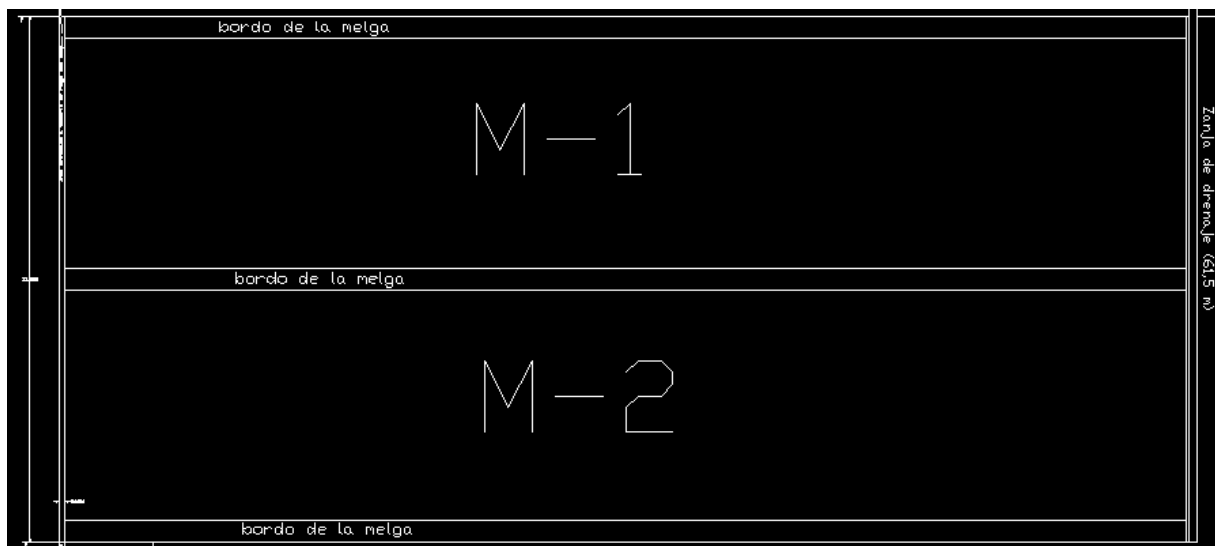
Para efectos del sistema de riego por melgas, se regará una melga a la vez, tomando en cuenta que caudal de agua del reservorio también es utilizado por las diferentes parcelas ocupadas por la Escuela de Ingeniería en Agronegocios.

A continuación se muestran las siguientes figuras las cuales son los planos de los diseños de las melgas:



AutoCAD

Figura 5. 16 Vista en planta del diseño de los sistemas de riego por melgas



AutoCAD

Figura 5.17 Vista en planta de una melga (unidades están en metros)

En la figura 5.16 se pueden ver donde termina la sección del riego por surcos y empieza el área donde se efectuará el riego por melga. En la figura 5.17 podemos observar la manera en la que irán dispuestas las dos melgas de (14,4 m de ancho x 70,5 m de largo).

5.7.7. Diseño de riego por cuadros: Método de Booher

Para este método se utilizará el cultivo de cebolla tal y como es común en Costa Rica. Al cambiar el cultivo a sembrar, se cambia totalmente el paradigma que se venía siguiendo en los riegos por surcos y melgas, ya que hay que recalcular la lámina neta del cultivo, y esto conlleva calcular los factores de: la profundidad de raíces efectivas en suelo arcilloso, y el nivel de agotamiento permisible para el cultivo.

La profundidad de raíces alcanzada para este cultivo generalmente ronda de 30 a 60 cm como máximo, esto sin restricciones al crecimiento de raíces (Allen, *et al* 2006), y es considerado con respecto al crecimiento de su raíz como un cultivo hortícola superficial (Alonso y Guzmán 2008). Thornthwaite y Mather (1957) hablan de que para cultivos como la cebolla, en suelos arcillosos no debe considerarse como profundidad de raíces efectivas más

de 25 cm. Por lo tanto se asumirá un valor de 25 cm para el cálculo de la lámina máxima retenida en el suelo.

Para el caso del cálculo de la lámina neta, la cual se obtiene de multiplicar la lámina máxima retenida en el suelo por un agotamiento permisible, se necesita previamente elegir éste valor. Allen, et al (2006) dice que se toma un nivel de agotamiento permisible para el cultivo de la cebolla igual a 30 %.

5.7.7.1. Cálculo de la lámina neta

Habiendo definido parámetros básicos para el diseño de un sistema de riego para el cultivo de la cebolla, dentro de los cuales cabe destacar una profundidad efectiva de 25 cm y un valor sugerido de agotamiento permisible de 30%, se precede a realizar el cálculo de la lámina máxima, para seguidamente obtener la lámina neta a aplicar para este caso.

Del cuadro 5.11 tenemos los siguientes datos del suelo:

Cuadro 5. 16 Algunas características del suelo

Parámetros	Profundidades		
	0-20 cm	20-40 cm	*40-75 cm
Pe (g/cm ³)	1,14	1,11	1,11
CC (%)	42,11	37,71	55,47
PMP (%)	21,42	19,24	28,03

Como se van a ocupar 25 cm de raíces productivas en suelo arcilloso, según el cuadro 5.16 se estaría tomando 20 cm del primer estrato y los 5 cm restantes del segundo estrato del suelo.

Dicho esto, aplicando la fórmula 3.19 para los 25 cm de raíces efectivas se realiza el siguiente procedimiento:

- Para los 20 cm:

$$Lm_{20cm} = \frac{(42,11 - 21,42)}{100} * 1,14 * 200 = 47,1732 \text{ mm}$$

- Para los 5 cm:

$$Lm_{5cm} = \frac{(37,71 - 19,24)}{100} * 1,11 * 50 = 10,2509 \text{ mm}$$

Habiendo calculado las láminas máximas por separado, se obtiene un total de 57,4241 mm.

Luego de obtener el resultado de la lámina máxima total, según la ecuación 3.20 se multiplica por el factor del nivel de agotamiento permisible y se obtiene así la lámina neta.

Esto se demuestra a continuación:

$$Ln = 57,4241 * 0,3 = 17,23 \text{ mm}$$

Por lo tanto esta lámina de 17,23 mm será la que se deberá de aplicar a cada cuadro.

5.7.7.2. Diseño de los cuadros

Para elegir el caudal se utiliza el cuadro 3.19, el cual para un suelo de textura arcillosa propone un caudal de 0,015 L/s x m² de superficie de cuadro.

Luego se procede a elegir el desnivel que debe de haber entre bordos (Z); se debe de tomar en cuenta de que se pueden tomar valores entre 6 y 9 cm como medidas recomendadas por el autor del método (Booher 1974); sin embargo, el criterio que más influye a la hora del diseño, es el de tomar como valor de Z un número lo más posiblemente cercano a la lámina neta. Para este caso debemos de acercarnos lo más posible a 1,7 o 2 cm; se tomará el valor de 2 cm como aceptable.

Se quiere diseñar un sistema de cuadros los cuales tengan un mínimo de ancho de 2,5 metros; ya que cuadros muy pequeños (2 m x 2 m) son más útiles para otros tipos de cultivo como frutales, trigo, alfalfa, entre otros que cubren todo el terreno (Cisneros 2003:85).

Grassi (1987) propone la ecuación 3.57 para obtener la longitud de cada cuadro, donde para este caso se despejará la pendiente de la poza de la siguiente manera:

$$L = \frac{Z}{S} \Rightarrow S = \frac{Z}{L} = \frac{0,02 \text{ m}}{2,5 \text{ m}} = 0,008 = 0,8\%$$

Esto quiere decir que para obtener cuadros de 2,5 metros de longitud, se ocupa nivelar el terreno a 0,8%. Si se quisieran diseñar cuadros de mayor tamaño el único inconvenientes es que se requerirían pendientes más cercanas a cero y sumado a esto se ocuparía más mano de obra. Sin embargo para efectos de este diseño se usará esta pendiente.

Seguidamente se procede con los demás cálculos.

Como las dimensiones de cada cuadro serían 2,5 x 2,5 m. Sabiendo esto, el caudal Q para cada cuadro sería el siguiente:

$$Q = 0,015 * 2,5 * 2,5 = 0,0937 \text{ L/s} = 0,3375 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para obtener la eficiencia de aplicación que va a tener nuestro riego por cuadros, se utiliza la ecuación 3.64, entrando con Z=0,02 m y la lámina neta que es igual a 17,23 mm = 0,01723 m, se tiene así:

$$Efa = \frac{2}{2 + \frac{0,02}{0,01723}} * 100 = 63,3 \%$$

Aunque se considera que un porcentaje idóneo es aquel igual o superior al 67% para riego por cuadros (Villalobos 2005); el valor obtenido se tomará como aceptable ya que se obtuvo una variación mínima del 3,7%.

Ahora para calcular el tiempo de aplicación del caudal, se debe utilizar la ecuación 3.65; en la cual se ingresa con el área del cuadro la cual es 6,25 m², la lámina neta de 17,23 mm, el caudal de 0,3375 m³/h y la eficiencia de aplicación del 0,633.

$$T_{ap} = \frac{17,23 * 6,25}{0.633 * 0.3375 * 1000} = 0,5041 \text{ horas}$$

Lo cual equivale aproximadamente a media hora de aplicación del caudal dado para cada cuadro. Se planea realizar un diseño de riego para 6 cuadros a hileras de dos cuadros cada una. Se llenará cada hilera de cuadros con un tiempo de aplicación de 1 hora ya que son dos cuadros.

La altura de los bordos permanentes será de 20 cm y una anchura de 30 cm (Cisneros 2003:85). Mientras que los bordos temporales serán de la misma altura que los bordos permanentes, sin embargo la anchura será de 25 cm, serán menos anchos partiendo del criterio que tienen que cerrarse nueva y rápidamente luego de cumplir el tiempo de aplicación de una hora.

El diseño para los seis cuadros se verá y se explicará a continuación. La figura 5.18 nos muestra una aproximación de cómo será el diseño del sistema, sin embargo esta consta de tres hileras de tres cuadros cada una, mientras que la del proyecto será de tres hileras pero cada una compuesta por dos cuadros. Cabe destacar que este diseño se basó sobre todo en la figura 3.10.

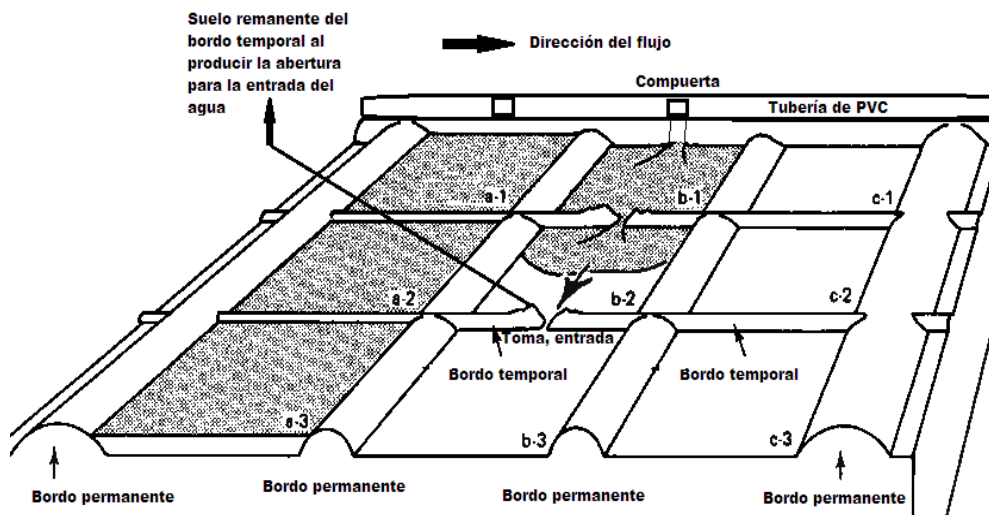


Figura 5. 18 Diagrama del diseño de los cuadros para el proyecto

5.7.7.3. Funcionamiento del sistema

El funcionamiento se explicará según la nomenclatura del diagrama antes presentado (figura 5.27). La modalidad que se puede tomar para el riego de los cuadros es llenando de agua cada hilera de cuadros. En el diagrama se explica que la hilera “a” (a-1, a-2, a-3) fue la primera en llenarse, la hilera “b” es la que se está llenando de agua y se utilizará para explicar el funcionamiento del sistema de los nueve cuadros, el cual sería el mismo para los 6 cuadros del diseño.

Para este caso, lo que se realiza es aplicar el caudal determinado que se le da a cada cuadro pero el tiempo no es igual al tiempo de aplicación, sino más bien es el triple del tiempo de aplicación. Este sería el tiempo que se debe durar en aplicar el caudal. El riego a cada cuadro se da mediante produciendo aberturas en el centro de cada bordo temporal y llenando la hilera completa de cuadros en el tiempo determinado.

Luego de que transcurre el tiempo determinado para llenar los tres cuadros de determinada hilera, entonces se cierra la compuerta y procede a cerrar la abertura que se produjo para que el agua llegara a cada cuadro, con la tierra remanente que se colocó sobre el bordo temporal, a cada extremo de la abertura (toma, entrada, etc.).

En el caso del *diseño real del proyecto*, el tiempo real de aplicación corresponde al doble del valor obtenido del tiempo aplicación (o sea $2T_{ap}$) porque son solo dos cuadros por hilera. Mientras que en lo que respecta al modo de operación, se sigue nada más lo anteriormente dicho explicado para el diagrama de la figura 5.18.

En la figura 5.19 se pueden observar los cuadros diseñados en base a lo anteriormente dicho:

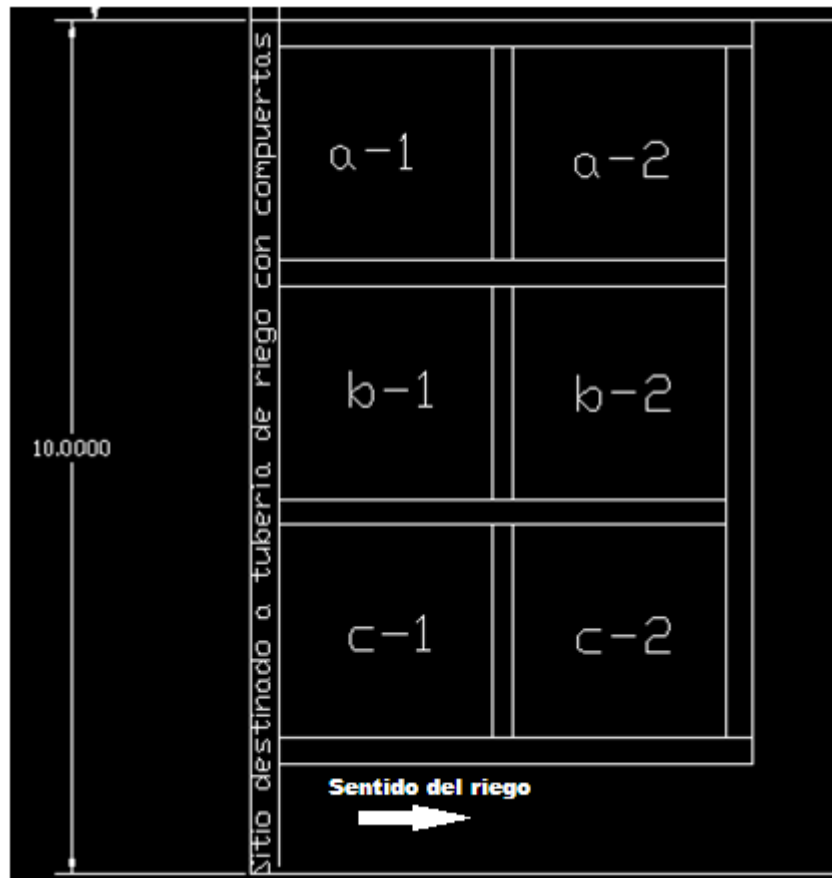


Figura 5. 19 Vista detallada del diseño en planta del sistema de riego por cuadros

5.7.8. Suministro del agua hacia las estructuras de riego

Se utilizará mangas para riego de PVC con compuertas, para el suministro del caudal sobre los surcos, melgas y cuadros, por lo tanto no se necesitan canales de riego, solamente se requiere que cada orificio riegue adecuadamente cada surco, melga y cuadro.

Se debe de asegurar de que vengan con salidas prefabricadas, las cuales vienen con una compuerta que permite regular la descarga y tener el caudal deseado o tapar el orificio y detener el flujo de agua. Si no también se pueden comprar por aparte, las cuales son en forma de adaptadores y simplemente se acoplan a la tubería. También se usarán unos plásticos a la salida del agua o sea cerca del orificio pero en la superficie del suelo, para prevenir la erosión del surco al caer el chorro del agua sobre el suelo. Estos se pueden visualizar bien en la figura del anexo 10.

La empresa Durman en el manual de Tubería para Riego por Compuertas proporciona tuberías de PVC para el riego por gravedad, que cuentan con las siguientes características:

- Presión nominal de 38,665 m.c.a
- Protección contra rayos ultravioleta
- Compuertas DAM GATE de fácil regulación para el control del caudal a la entrada del surco.
- Las ventajas del PVC tales como: peso liviano, baja rugosidad, facilidad de limpieza y mantenimiento, resistencia, entre otras.
- Las tuberías vienen con orificios según sea el cultivo que se necesite, por lo tanto pueden estar espaciadas 0,8 m para el cultivo de maíz.

Las compuertas están compuestas por tres piezas: empaquetadura, delantera y gancho.

Para la elección de la tubería que se va a elegir, se decidió de acuerdo a su capacidad de conducción. Por lo tanto, dado a que en un momento del sistema estarán 18 surcos con un caudal de 26,085 L/min, esto igual a 7,83 L/s (caudal que debe de pasar por ese momento en la tubería); entonces se elige una tubería de un diámetro que tenga una capacidad de transporte de agua mayor a la requerida. Dicho esto y teniendo el siguiente cuadro 5.17 a continuación se decide a elegir el diámetro de la tubería:

Cuadro 5. 17 Pérdidas de presión en metros por cada 100 m de tubería calculadas con la fórmula de Hazen-Williams

CAUDAL		DIAMETRO NOMINAL			
Caudal (gpm)	Caudal (lps)	6"	8"	10"	12"
50	3,2	—	—	—	—
80	5,0	—	—	—	—
90	5,7	0,05	—	—	—
100	6,3	0,06	—	—	—
150	9,5	0,12	—	—	—
200	12,6	0,20	0,08	—	—
250	15,8	0,31	0,12	—	—
300	18,9	0,43	0,17	—	—
350	22,1	0,57	0,23	0,08	—
400	25,2	0,73	0,29	0,10	—
450	28,4	0,91	0,36	0,12	—
500	31,5	1,11	0,44	0,15	0,05
550	34,7	1,32	0,53	0,18	0,05
600	37,9	1,55	0,62	0,21	0,06
650	41,0	1,80	0,72	0,24	0,07
700	44,2	2,07	0,82	0,28	0,09
750	47,3	2,35	0,94	0,32	0,10
800	50,5	2,64	1,06	0,36	0,11
850	53,6	2,96	1,18	0,40	0,12
900	56,8	3,29	1,31	0,44	0,14
1000	63,1	4,00	1,60	0,54	0,16
1100	69,4	4,77	1,90	0,64	0,20
1200	75,7	5,60	2,24	0,75	0,23
1300	82,0	6,50	2,59	0,88	0,27
1400	88,3	7,46	2,98	1,00	0,31
1500	94,6	8,47	3,38	1,14	0,35
1600	100,9	9,55	3,81	1,29	0,39
1700	107,3	10,68	4,26	1,44	0,44
1800	113,6	—	4,74	1,60	0,49
1900	119,9	—	5,24	1,77	0,54
2000	126,2	—	5,76	1,94	0,60
2500	157,7	—	8,71	2,94	0,90
3000	189,3	—	12,21	4,12	1,26
3500	220,8	—	16,24	5,48	1,68
4000	252,4	—	—	7,02	2,15
4500	283,9	—	—	8,73	2,67
5000	315,5	—	—	10,61	3,25
5500	347,0	—	—	12,65	3,88
6000	378,5	—	—	—	4,55

Como se puede observar, la tubería que sirve para fines de este proyecto correspondería a la tubería de 6 pulgadas de diámetro nominal la cual da un caudal de 9,5 L/s. Las pérdidas por fricción para esta tubería por cada 100 m corresponden a 0,12 m. c. a. Para este estudio al requerirse una tubería de 71,5 metros; se perderían solamente 0,0858 metros de pérdidas por fricción.

También para efectos de diseño, se nos proporciona el siguiente cuadro 5.18 el cual muestra los valores de caudal, abertura de la compuerta, y presión para el cálculo del caudal que va a suministrar la compuerta.

Cuadro 5. 18 Cálculo del caudal de la compuerta en L/s

Presión (m)	Full abierta	3/4 abierta	1/2 abierta	1/4 abierta
0,08	2,42	1,80	1,20	0,54
0,15	2,85	2,08	1,37	0,61
0,23	3,17	2,33	1,56	0,69
0,30	3,52	2,73	1,70	0,77
0,46	4,08	3,04	2,00	0,88
0,61	4,61	3,38	2,25	1,00
0,76	4,82	3,63	2,45	1,09
0,91	5,21	3,94	2,61	1,17
1,22	5,99	4,77	2,99	1,32
1,52	6,43	5,19	3,15	1,48

El precio del tubo de 9 metros con 11 compuertas cada uno es de aproximadamente \$338 más transporte (Cubero 2014). Por lo tanto, solo en tubería se ocuparían \$2704.

5.7.9. Zanja de drenaje

Se construirá un canal de drenaje o de evacuación de aguas de 61,5 metros de longitud que abarca las áreas para riego por surcos y melgas. El caudal de diseño será el más crítico, es decir, el caudal más elevado. Para ello se toman los tres caudales unitarios por aplicar en cada surco, en cada melga y en cada cuadro

Se tiene que son $0,00043475 \text{ m}^3/\text{s}$ el caudal máximo para regar un surco, mientras que $0,0045897 \text{ m}^3/\text{s}$ para melgas y aproximadamente $0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada cuadro. Como se puede observar el caudal de más demanda de agua es el utilizado para cada melga, por lo tanto se diseñará para este valor.

Para el diseño del canal se parte de los siguientes datos:

- Sección transversal = trapezoidal
- Caudal = $0,0045897 \text{ m}^3/\text{s}$

- Rugosidad = 0,025 (para canales y zanjas en tierra, alineados y uniformes (Villón 2009:25; Valverde 2007:126)
- Pendiente = 1,5 % (esta es la pendiente transversal dada para el área de riego, y con la que irá el canal)

Dados estos valores iniciales, se diseña el canal utilizando las consideraciones prácticas para el diseño de canales, según el procedimiento descrito en el Manual Práctico para el diseño de canales (Villón 2009:34-38).

Según este mismo autor, para caudales menores a $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ se recomiendan anchos de solera de 30 cm o menos, según el ancho de la pala de la maquinaria con que se construirá el canal. Debido a que se construirá manualmente para minimizar costos, se tomará un ancho de solera de 30 cm.

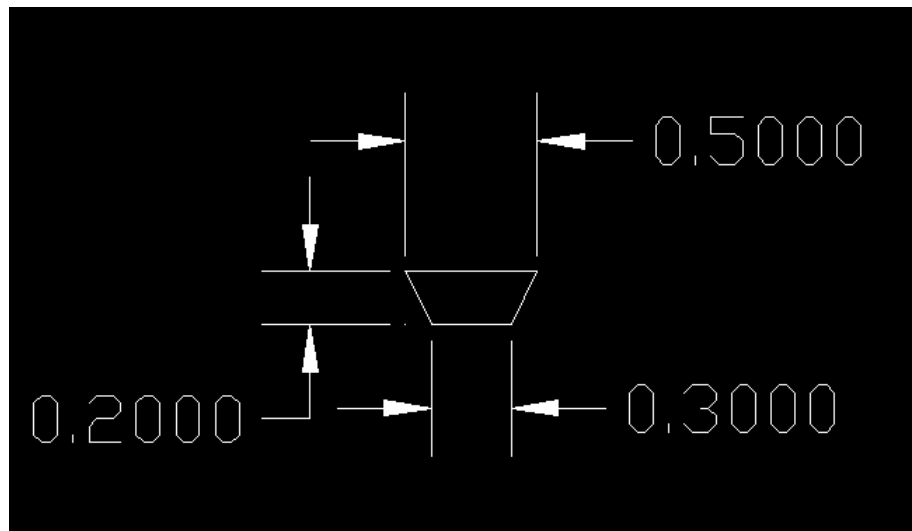
Dicho esto, ahora el tirante, como una regla práctica se puede obtener mediante la relación la cual es que el tirante es igual a la tercera parte del ancho de solera. Por lo tanto se tendría lo siguiente:

$$y = \frac{30 \text{ cm}}{3} = 10 \text{ cm}$$

Seguidamente, para calcular el bordo libre del canal, la Secretaría de Recursos Hidráulicos de México (Villón 2009) propone que para caudales menores o iguales a $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ el bordo libre sea igual a 10 cm. De este modo, éste será el valor que se le dará al bordo libre.

Obtenidos estos resultados, la profundidad total del canal será de 20 cm y el talud que se le va a propiciar al canal es de 1, por lo tanto el espejo de agua sería igual a 50 cm.

A continuación se muestra una representación de la sección transversal que acarreará el excedente de agua proveniente del riego o de alguna precipitación.



AutoCAD

Figura 5. 20 Dimensiones en metros de la sección transversal del canal de drenaje

Con estas dimensiones de canal, si se aplica la ecuación de Manning se obtiene una velocidad del flujo igual a 0,82 m/s, esto para el caso de que se produjera el caudal máximo. Si la velocidad máxima permisible para canales en tierra arcillosa es de 0,9 m/s (Villón 2009) quiere decir que el diseño está correcto.

Igualmente cabe destacar que el canal está capacitado para soportar más que para lo que se le diseñó; esto se hizo con de que la zanja pueda resistir caudales mayores a los que pueden producirse por el riego y alguna precipitación imprevista, sin ocupar tanto mantenimiento después del evento.

La zanja diseñada se puede observar a continuación en el siguiente dibujo:

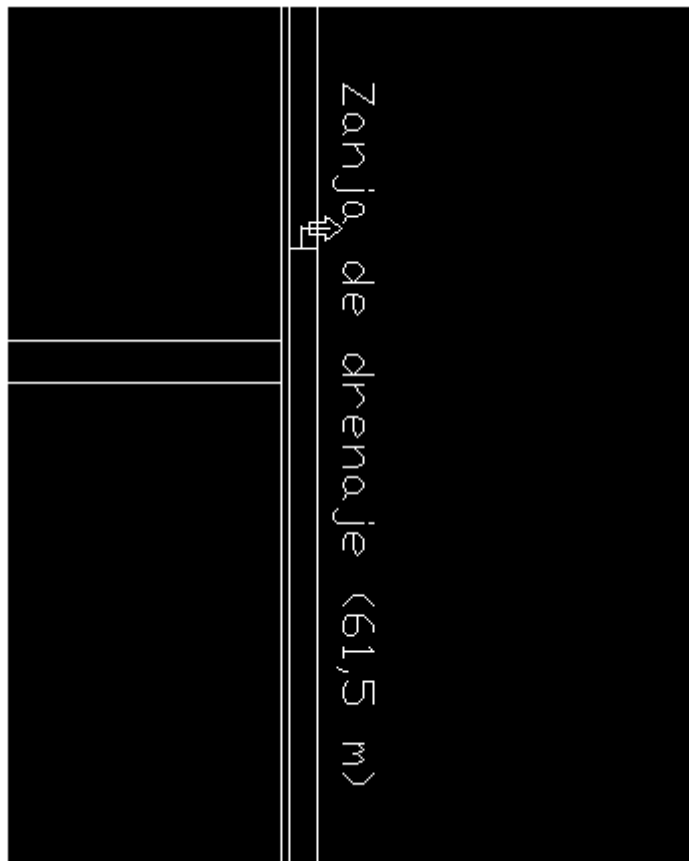


Figura 5. 21 Zanja de drenaje

5.7.10. Diseño en planta de los sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros.

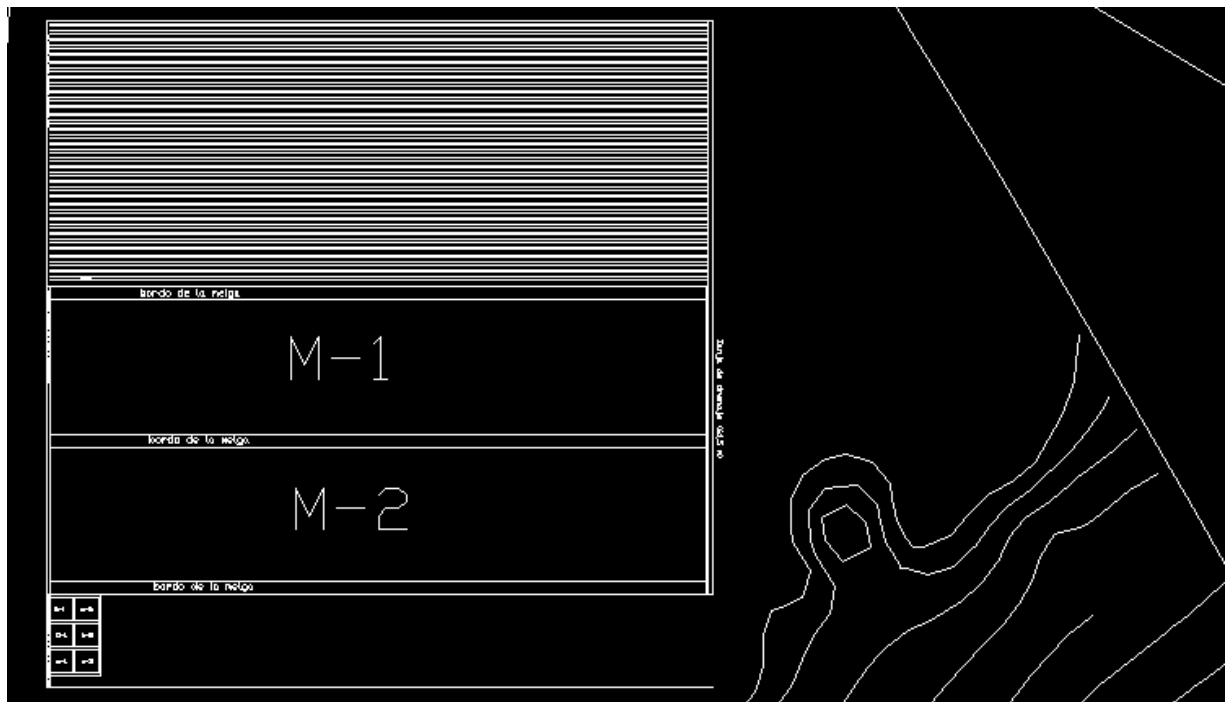
El diseño en planta del sistema de riego integrado, que comprende los sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros, se pueden observar en la figura 5.22.

Seguidamente se muestra el cuadro resumen, el cual acoge los aspectos más importantes de cada método de riego:

Cuadro 5. 19 Cuadro resumen de los diseños de sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros

Método de riego	Parámetro de diseño										
	Cultivo	Q (L/s)	Q _{máx} (L/s)	Q _{infl} (L/s)	Tiempo apl.(h)	Ancho (m)	Largo (m)	Espejo de agua x altura(m)	Separación (m)	Bordos (ancho x altura)(m)	Cantidad
Surcos	Maíz	---	0,4347	0,191	12,66*	---	70,5	0,25 x 0,1	0,8	---	35
Melgas	Maíz	4,5897	---	---	6,54	14,4	70,5	---	1,4	1,4 x 0,20	2
Cuadros	Cebolla	0,0937	---	---	0,5	2,5	2,5	---	0,3	0,3 x 0,20 y 0,25 x 0,20	6

*Tiempo particionado = 2,53 horas destinadas para el caudal Q_{máx} y 10,13 horas para el Q_{infl}



AutoCAD

Figura 5. 22 Diseño en planta del sistema de riego integrado

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a) Se realizaron satisfactoriamente los diseños de los sistemas de riego por surcos, melgas y cuadros cumpliendo con todos los criterios de diseño establecidos; obteniendo entre todos los sistemas mayor eficiencia en el riego por cuadros (63,3%).
- b) Se propuso la nivelación de terreno, en la que implica movimientos de tierra los cuales no son rentables ya que se habla de un costo de \$326064 aproximadamente.
- c) No se recomiendan movimientos de tierra en este terreno, debido a que tiene pendientes medias relativamente fuertes para riego por gravedad y presenta muchas irregularidades a lo largo del terreno, lo que con lleva a realizar grandes movimientos de terreno y esto encarece el proyecto.
- d) Los suelos de las aproximadamente tres hectáreas son de textura arcillosa con características expansivas, presentándose a los 40 centímetros alta presencia de arcilla, llegando a niveles de hasta 81,56 % de arcilla.
- e) Se evidenció que mientras mayores sean las pendientes que se usan en un diseño de riego por gravedad, menores serán los caudales que tienen que aplicarse a los sistemas; en este caso, a las melgas y surcos; ya que se hablan de caudales muy pequeños, si los comparamos con los que pueden transmitir cada compuerta de riego.
- f) Se sobre diseñó la zanja de drenaje con el fin de que no haya que darle mucho mantenimiento en caso de que ocurran precipitaciones fuertes sobre la zona; en los meses donde más se presenta el agua.
- g) Para suelos de textura arcillosa con la característica de tener arcillas expandibles, se recomienda hacer la prueba de infiltración en un momento en que el suelo esté suficientemente húmedo; ya sea coordinando con la época de invierno o si se tiene la facilidad, aplicar riegos continuos y luego realizar la prueba de infiltración en ese debido momento, para que no se produzcan los inconvenientes obtenidos durante las pruebas en este trabajo.
- h) En caso de que se tenga la facilidad de construir alguna de estas estructuras de riego previamente, se recomienda el realizar las pruebas de infiltración por el método de surco infiltrómetro, para obtener resultados más cercanos a la realidad.

- i) Se recomienda una vez realizados los surcos, hacer pruebas con los caudales propuestos (pruebas de avance) para determinar la longitud optima del surco, en caso de que fuera mayor a la realizada en el campo se obtendría un menor tiempo de avance y por lo tanto es fundamental su corrección en el diseño propuesto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aidarov, P; Golovanov, I; Mamaev, G. 1985. El Riego. Moscú, RU, Editorial Mir. 367 p.
- Allen, RG; Pereira, LS; Raes, D; Smith, M. 2006. Guía para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos. Roma, IT, FAO. 323 p. (Estudio FAO: riego y drenaje, no. 53).
- Alonso, AM; Guzmán, GI. 2008. Buenas Prácticas en Producción Ecológica: Cultivo de Hortícolas. ES, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Marino. 31 p.
- Barber, RG; Navarro, F. 1994. The rehabilitation of degraded soils in eastern Bolivia by subsoiling and the incorporation of cover crops. Land Degradation and Rehabilitation. no. 5:247-259.
- Booher, LJ. 1974. El riego superficial. Roma, IT, FAO. 162 p.
- Bondurant, JA. 1957. Developing a furrow infiltrometer. Agricultural Engineering. no. 38: 602-604.
- Brouwer, C; Heibloem, M. 1985. Irrigation Water Needs: Irrigation water management training manual. Roma, IT, FAO. 74 p.
- Chow, Ven Te. 1994. Hidráulica de canales abiertos. Santa Fé, CO, McGraw-Hill. 337 p.
- Cisneros, R. 2003. Apuntes de la materia de riego y drenaje. San Luis Potosí, MX, Centro de investigación y estudios de postgrado y área agrogeodésica. 164 p.
- Doorenbos, J; Kassam, AH. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma, IT, FAO. 212 p. (Estudio FAO: riego y drenaje, no. 33).
- Doorenbos, J; Pruitt, WO. 1976. Crop water requirements. Roma, IT, FAO. 156 p. (Estudio FAO: riego y drenaje, no. 24).
- Faci, JM; Playán, E. 1996. Principios básicos del riego por superficie. Hojas divulgadoras. no. 10-11/94:17-21.

- FAO. 2014. El Manejo de Suelos de Arcillas Expandibles (en línea). Consultado 7 de jun. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/soils-portal/manejo-del-suelo/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-de-arcillas-expandibles/es/>
- Fernández, R. 2010. Manual de riego para Agricultores: módulo 2. Riego por superficie. Sevilla, ES, Servicio de Publicaciones y Divulgación, D.L. 103 p.
- Finkel, HJ. 1982. Gravity irrigation. Florida, US, Ed. por H.J. Finkel. CRC Press, Boca Ratón. 339-358 pp.
- Forsythe, W. 1975. Manual de laboratorio: Física de suelos. San José, CR, Editorial IICA. 134 p.
- Fuentes, JL. 1998. Técnicas de Riego. Madrid, ES, Editorial Mundi-Prensa. 482 p.
- Grantón, M; Benavidez, R; Valenti, R; Arevalo, E. (1998). Características hídricas de los suelos. Métodos de laboratorio y estimaciones: su evaluación y aplicaciones para suelos de Entre Ríos. Villa Carlos Paz, AR. 19-20 p. (Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia de Suelos)
- Grassi, CJ. 1987. Diseño y operación del riego por superficie. Mérida, VE, CIDIAT. 415 p.
- Grassi, CJ. 1988. Fundamentos de riego. Mérida, VE, CIDIAT. 409 p.
- Gurovich, LA. 1985. Fundamentos y diseños de sistemas de riego. San José, CR, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 433 p.
- Hargreaves, GH; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.
- Honorato, R. 2000. Manual de Edafología. 4a edición. Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Isaelsen, OW. 1950. Irrigation principles and practices. New York, US, John Wiley & Sons. 405 p.

- Israelsen, OW; Hansen, VE. 1979. Principios y aplicaciones del riego. Barcelona, ES, Reverté. 336 p.
- Keller, J; Bliesner, RD. 1990. Sprinkle and trickle irrigation. New York, US, Van Nostrand Reinhold. 652 p.
- Olarte, W. 1987. Manual de riego por gravedad. PE, Comisión Coordinadora de Tecnología Andina - CCTA. 148 p. (Series Manuales Técnicos N° 1).
- Ollier, Ch; Poiree, M. 1981. Irrigation, les reseaux d'irrigation, theorie, technique et economie des arrosages. Eyrolles. Paris, FR. 503 pp.
- Ortiz, B; Ortiz, A. 1988. Edafología. Chapingo, MX, Universidad Autónoma Chapingo. 372 p.
- Palacios, E. 1999. ¿Por qué, Cuándo, Cuánto y Cómo Regar?. Para Lograr Mejores Cosechas. MX, Editorial Trillas Sa De Cv. 216 p.
- Pascual, B. 2008. Riegos de gravedad y a presión. D.F, MX, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. 376 p.
- Pascual, B; Noguera, V. 1987. Fitotecnia General: Fertilización. Valencia, ES, Departamento de Producción Vegetal. 431 p.
- Porta, CJ; Acevedo, ML; Roquero, C. 1999. Edafología para agricultura y medio ambiente. Madrid, ES, Mundi Prensa. 849 p.
- Lázaro, P; Saucedo, H; Zataráin, F. 2010. Riego por gravedad. MX, Instituto Mexicano de Tecnología y del Agua. 25 p.
- Leitón, J. 1985. Riego y drenaje. San José, CR, Editorial EUNED. 180 p.
- Llorca, M. 1982. Eficiencias en los diversos sistemas de riegos. II curso sobre Tecnología del riego. Lleida, ES, Servicio de Publicaciones. 347-361 p.
- Sánchez, RM; Peralta, SS. 2011. Nivelación de suelos para riego por gravedad mediante el método de perfiles medios. Buenos Aires, AR, INTA-E.E.A. Hilario Ascasubi. 15 p.

- Singer, M; Munns, D. 1999. Soil an Introduction. 4 ed. US, Prentice Hall. 527 p.
- Thornthwaite, CW; Mather, JR. 1955. The Water Balance. Drexel Institute of Technology (Philadelphia) Laboratory of Climatology, Centerton, N.J. Publications in climatology, v. 8, no. 1 .
- Universidad Mayor de San Simon (UMSS). 1999. Balance Hídrico de la Producción Agrícola en el Valle Central de Cochabamba. Cochabamba, BO, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias “Martín Cárdenas”.
- Universidad Nacional de Entre Ríos. 2014. Tecnología de Tierras y Aguas I: Riego por melgas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Consultado 18 de mayo. 2014. Disponible en: <http://www.fca.uner.edu.ar/academicas/deptos/catedras/riego/Archivos/Cap%2011%20-%20Riego%20por%20Melgas.pdf>
- Valverde, JC. 2007. Riego y drenaje. Segunda reimpresión. San José, CR, Editorial EUNED. 244 p.
- Villalobos, M. 2008. Fundamentos de riego. Cartago, CR, Ediciones Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico. 208 p.
- Villalobos, M. 2008. Riego por surcos. Cartago, CR, Ediciones Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico. 109 p.
- Villalobos, M. 2005. Riego por melgas. Cartago, CR, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 90 p.
- Villón, M. 2009. Manual Práctico para el diseño de canales. Cartago, CR, Centro de Desarrollo de Material Bibliográfico. 134 p.
- Wilson, M; Cerana, J. 2004. Mediciones físicas en suelos con características vérticas. Revista Científica Agropecuaria. no. 8(1): 11-22

ANEXOS

Anexo 1 Valores de Kc para diferentes cultivos (Fuente: Palacios 1999)

CULTIVOS ANUALES																	
% DE DESARROLLO	MAÍZ	TRIGO	ALGODÓN	BORDO	CARTAMO	SOYA	ARROZ	FRÍJOL	AJONJOLÍ	GARBANZO	CEBADA	Jitomate	LINAZA	CILLE	PAPA	CACAHUATE	CUCURBITACEAS
0	0.42	0.15	0.20	0.30	0.14	0.51	0.45	0.50	0.30	0.30	0.15	0.43	0.30	0.48	0.30	0.15	0.45
5	0.45	0.20	0.22	0.35	0.16	0.45	0.50	0.54	0.35	0.35	0.20	0.43	0.35	0.50	0.35	0.17	0.47
10	0.48	0.30	0.25	0.40	0.18	0.41	0.55	0.60	0.40	0.40	0.30	0.43	0.40	0.55	0.40	0.20	0.50
15	0.51	0.40	0.25	0.45	0.22	0.45	0.65	0.65	0.50	0.50	0.40	0.45	0.50	0.65	0.45	0.25	0.53
20	0.60	0.55	0.32	0.60	0.27	0.51	0.72	0.73	0.60	0.55	0.55	0.45	0.55	0.75	0.50	0.29	0.56
25	0.65	0.70	0.40	0.70	0.35	0.51	0.80	0.80	0.70	0.65	0.70	0.50	0.70	0.80	0.60	0.36	0.60
30	0.70	0.90	0.50	0.80	0.44	0.51	0.85	0.90	0.80	0.70	0.90	0.55	0.90	0.90	0.70	0.43	0.65
35	0.80	1.10	0.62	0.90	0.54	0.52	0.90	0.97	0.87	0.75	1.10	0.65	1.00	0.95	0.62	0.82	0.70
40	0.90	1.25	0.89	1.00	0.64	0.55	0.92	1.05	0.95	0.78	1.25	0.75	1.10	0.93	0.97	0.61	0.75
45	1.00	1.40	0.90	1.08	0.76	0.57	0.93	1.10	1.00	1.80	1.40	0.85	1.15	1.03	1.05	0.61	0.80
50	1.05	1.50	0.98	1.07	0.88	0.60	0.93	1.12	1.10	0.82	1.50	0.95	1.20	1.05	1.16	0.80	0.81
55	1.07	1.57	1.00	1.05	0.97	0.63	0.93	1.12	1.20	0.85	1.57	1.00	1.28	1.05	1.25	0.90	0.82
60	1.08	1.62	1.02	1.00	1.07	0.66	0.92	1.10	1.28	0.85	1.62	1.03	1.30	1.05	1.30	1.00	0.80
65	1.07	1.61	1.00	0.95	1.07	0.68	0.90	1.05	1.30	0.82	1.61	1.02	1.35	1.03	1.35	1.01	0.79
70	1.05	1.55	0.95	0.90	1.08	0.70	0.85	1.02	1.32	0.80	1.55	0.98	1.30	1.00	1.38	1.02	0.77
75	1.02	1.45	0.87	0.82	1.02	0.70	0.80	0.95	1.29	0.75	1.45	0.95	1.28	0.97	1.38	0.91	0.75
80	1.00	1.30	0.80	0.75	0.96	0.69	0.66	0.87	1.25	0.70	1.30	0.90	1.25	0.90	1.35	0.80	0.72
85	0.95	1.10	0.75	0.70	0.86	0.63	0.63	0.80	1.10	0.65	1.10	0.85	1.10	0.85	1.33	0.60	0.71
90	0.90	0.95	0.65	0.65	0.76	0.56	0.58	0.72	1.00	0.60	0.95	0.80	0.95	0.80	1.30	0.41	0.70
95	0.87	0.80	0.55	0.60	0.60	0.43	0.55	0.70	0.90	0.50	0.80	0.75	0.60	0.70	1.25	0.25	0.67
100	0.85	0.62	0.50	0.55	0.45	0.31	0.47	0.62	0.50	0.40	0.62	0.70	0.60	0.60	1.20	0.11	0.65

Anexo 2 Coeficientes de desarrollo de Kc para uso en el cálculo de usos consuntivos. (Fuente: Palacios 1999)

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

Anexo 3 Longitud máxima de surcos (m) y caudal máximo a aplicar según pendiente, textura y lámina requerida. (Fuente: Villalobos 2008)

S ↓	Q ↓ %	TEXTURA																							
		Finas					Mod finas			Medias					Mod gruesas			Gruesas					Muy gruesas		
		Lámina (cm)					Lámina (cm)			Lámina (cm)					Lámina (cm)			Lámina (cm)					Lámina (cm)		
		5	7,5	10	15	24	5	7,5	10	5	7,5	10	15	20	5	7,5	10	5	7,5	10	15	20	5	7,5	10
0,25	2,52	320	388	457	535	630	288	350	396	251	297	350	440	500	198	243	281	152	182	213	265	300	61	83	99
0,50	1,26	220	268	304	380	430	198	243	274	187	205	236	300	350	137	167	190	99	121	144	180	200	45	53	65
0,75	0,84	175	213	243	305	330	152	182	213	129	160	190	235	280	106	129	152	83	99	114	145	170	38	45	53
1,00	0,63	144	182	205	260	300	129	160	182	114	137	160	200	230	91	106	129	68	83	99	120	150	30	38	45
1,50	0,42	114	144	167	215	250	106	129	152	91	114	129	160	200	76	91	106	53	68	76	100	120	-	30	38
2,00	0,32	99	121	144	185	200	91	106	121	76	91	106	140	180	60	76	91	45	60	68	85	100	-	30	30
2,50	0,25	91	106	129	160	-	76	91	114	68	83	99	120	-	53	68	76	38	53	60	70	-	-	-	30
3,00	0,21	83	99	114	145	-	68	83	106	60	76	91	110	-	45	60	68	38	45	53	65	-	-	-	-
4,00	0,16	68	83	99	120	-	60	76	91	53	60	76	90	-	45	53	60	30	38	45	60	-	-	-	-
5,00	0,13	60	76	83	105	-	53	68	76	45	53	68	85	-	38	45	53	30	30	38	50	-	-	-	-

Anexo 4 Valores de radiación extraterrestre para usar en la ecuación de Hargreaves

La Radiación Extraterrestre "Ra" Expresada en equivalentes de evaporación mm/día

Hemisferio Norte												Latitud	Hemisferio Sur											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48°	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46°	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44°	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42°	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40°	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38°	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36°	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34°	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32°	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30°	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28°	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26°	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24°	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22°	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20°	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18°	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16°	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14°	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12°	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10°	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8°	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6°	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4°	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2°	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0°	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Anexo 5 Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°1 para el suelo del terreno A₁

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
0,32	0,32	0,16	10,00	10,00	1875,00
0,33	0,65	0,49	10,00	20,00	1818,18
0,42	1,07	0,86	10,00	30,00	1428,57
0,43	1,50	1,29	10,00	40,00	1395,35
0,44	1,94	1,72	10,00	50,00	1363,64
0,49	2,43	2,19	10,00	60,00	1224,49
0,55	2,98	2,71	10,00	70,00	1090,91
0,47	3,45	3,22	10,00	80,00	1276,60
0,50	3,95	3,70	10,00	90,00	1200,00
0,59	4,54	4,25	10,00	100,00	1016,95
0,54	5,08	4,81	10,00	110,00	1111,11
0,61	5,69	5,39	10,00	120,00	983,61
0,66	6,35	6,02	10,00	130,00	909,09
0,64	6,99	6,67	10,00	140,00	937,50
0,69	7,68	7,34	10,00	150,00	869,57
0,76	8,44	8,06	10,00	160,00	789,47
0,83	9,27	8,86	10,00	170,00	722,89
0,81	10,08	9,68	10,00	180,00	740,74
0,82	10,90	10,49	10,00	190,00	731,71
0,75	11,65	11,28	10,00	200,00	800,00
0,91	12,56	12,11	10,00	210,00	659,34
0,88	13,44	13,00	10,00	220,00	681,82
0,73	14,17	13,81	10,00	230,00	821,92
0,83	15,00	14,59	10,00	240,00	722,89
0,74	15,74	15,37	10,00	250,00	810,81
0,86	16,60	16,17	10,00	260,00	697,67
0,99	17,59	17,10	10,00	270,00	606,06

Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°1 para el suelo del terreno A₁
(continuación)

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
1,05	20,60	20,08	10,00	300,00	571,43
0,98	21,58	21,09	10,00	310,00	612,24
1,03	22,61	22,10	10,00	320,00	582,52
1,02	23,63	23,12	10,00	330,00	588,24
1,05	24,68	24,16	10,00	340,00	571,43
1,05	25,73	25,21	10,00	350,00	571,43
1,00	26,73	26,23	10,00	360,00	600,00
0,93	27,66	27,20	10,00	370,00	645,16
1,10	28,76	28,21	10,00	380,00	545,45
1,07	29,83	29,30	10,00	390,00	560,75
1,08	30,91	30,37	10,00	400,00	555,56
1,17	32,08	31,50	10,00	410,00	512,82
1,17	33,25	32,67	10,00	420,00	512,82
1,13	34,38	33,82	10,00	430,00	530,97
1,10	35,48	34,93	10,00	440,00	545,45
1,10	36,58	36,03	10,00	450,00	545,45
1,07	37,65	37,12	10,00	460,00	560,75
1,07	38,72	38,19	10,00	470,00	560,75
1,15	39,87	39,30	10,00	480,00	521,74
1,05	40,92	40,40	10,00	490,00	571,43
1,12	42,04	41,48	10,00	500,00	535,71
1,13	43,17	42,61	10,00	510,00	530,97
1,15	44,32	43,75	10,00	520,00	521,74
1,18	45,50	44,91	10,00	530,00	508,47
1,16	46,66	46,08	10,00	540,00	517,24
1,20	47,86	47,26	10,00	550,00	500,00
1,18	49,04	48,45	10,00	560,00	508,47

Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N° 1 para el suelo del terreno A₁
(continuación)

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
1,22	51,32	50,71	10,00	580,00	491,80
1,13	52,45	51,89	10,00	590,00	530,97
0,97	53,42	52,94	10,00	600,00	618,56
1,05	54,47	53,95	10,00	610,00	571,43
1,05	55,52	55,00	10,00	620,00	571,43
1,08	56,60	56,06	10,00	630,00	555,56
1,27	57,87	57,24	10,00	640,00	472,44
1,15	59,02	58,45	10,00	650,00	521,74
1,25	60,27	59,65	10,00	660,00	480,00
1,22	61,49	60,88	10,00	670,00	491,80
1,22	62,71	62,10	10,00	680,00	491,80
1,16	63,87	63,29	10,00	690,00	517,24
1,23	65,10	64,49	10,00	700,00	487,80
1,15	66,25	65,68	10,00	710,00	521,74
1,15	67,40	66,83	10,00	720,00	521,74
1,28	68,68	68,04	10,00	730,00	468,75
1,17	69,85	69,26	10,00	740,00	514,29
1,30	71,15	70,50	10,00	750,00	461,54
1,35	72,50	71,82	10,00	760,00	444,44
1,30	73,80	73,15	10,00	770,00	461,54
1,40	75,20	74,50	10,00	780,00	428,57
1,23	76,43	75,81	10,00	790,00	486,49
1,35	77,78	77,11	10,00	800,00	444,44
1,35	79,13	78,46	10,00	810,00	444,44
1,30	80,43	79,78	10,00	820,00	461,54
1,37	81,80	81,11	10,00	830,00	439,02
1,38	83,18	82,49	10,00	840,00	433,73

Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N° 1 para el suelo del terreno A₁
(continuación)

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
1,43	85,86	85,15	10,00	860,00	418,60
1,37	87,23	86,55	10,00	870,00	439,02
1,43	88,66	87,95	10,00	880,00	418,60
1,40	90,06	89,36	10,00	890,00	428,57
1,45	91,51	90,79	10,00	900,00	413,79
1,43	92,95	92,23	10,00	910,00	418,60
1,40	94,35	93,65	10,00	920,00	428,57
1,43	95,78	95,06	10,00	930,00	418,60
1,38	97,16	96,47	10,00	940,00	433,73
1,40	98,56	97,86	10,00	950,00	428,57
1,43	100,00	99,28	10,00	960,00	418,60
1,45	101,45	100,72	10,00	970,00	413,79
1,45	102,90	102,17	10,00	980,00	413,79
1,47	104,36	103,63	10,00	990,00	409,09
1,38	105,75	105,06	10,00	1000,00	433,73
1,38	107,13	106,44	10,00	1010,00	433,73
1,38	108,51	107,82	10,00	1020,00	433,73
1,38	109,90	109,21	10,00	1030,00	433,73
1,45	111,35	110,62	10,00	1040,00	413,79
1,45	112,80	112,07	10,00	1050,00	413,79
1,45	114,25	113,52	10,00	1060,00	413,79
1,45	115,70	114,97	10,00	1070,00	413,79
1,45	117,15	116,42	10,00	1080,00	413,79
1,45	118,60	117,87	10,00	1090,00	413,79

Anexo 6 Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°2 para el suelo del terreno A₁

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
0,92	0,92	0,46	30,00	30,00	1963,64
1,17	2,08	1,50	30,00	60,00	1542,86
1,18	3,27	2,68	30,00	90,00	1521,13
1,27	4,53	3,90	30,00	120,00	1421,05
1,27	5,80	5,17	30,00	150,00	1421,05
1,47	7,27	6,53	30,00	180,00	1227,27
1,52	8,78	8,03	30,00	210,00	1186,81
1,67	10,45	9,62	30,00	240,00	1080,00
1,75	12,20	11,33	30,00	270,00	1028,57
1,75	13,95	13,08	30,00	300,00	1028,57
1,75	15,70	14,83	30,00	330,00	1028,57
1,92	17,62	16,66	30,00	360,00	939,13
2,18	19,80	18,71	30,00	390,00	824,43
2,38	24,53	23,34	30,00	450,00	755,24
2,42	26,95	25,74	30,00	480,00	744,83
2,45	29,40	28,18	30,00	510,00	734,69
2,58	31,98	30,69	30,00	540,00	696,77
2,75	34,73	33,36	30,00	570,00	654,55
2,75	37,48	36,11	30,00	600,00	654,55
2,78	40,27	38,88	30,00	630,00	646,71
2,90	43,17	41,72	30,00	660,00	620,69
3,12	46,28	44,73	30,00	690,00	577,54
3,17	49,45	47,87	30,00	720,00	568,42
3,37	52,82	51,13	30,00	750,00	534,65
3,37	56,18	54,50	30,00	780,00	534,65
3,42	59,60	57,89	30,00	810,00	526,83
3,43	63,03	61,32	30,00	840,00	524,27
3,63	66,67	64,85	30,00	870,00	495,41
3,63	70,30	68,48	30,00	900,00	495,41
3,75	74,05	72,18	30,00	930,00	480,00
3,92	77,97	76,01	30,00	960,00	459,57
3,93	81,90	79,93	30,00	990,00	457,63
3,97	85,87	83,88	30,00	1020,00	453,78

Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°3 para el suelo del terreno A₂ (continuación)					
Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
4,08	93,97	91,93	30,00	1080,00	440,82
4,20	98,17	96,07	30,00	1110,00	428,57
4,35	102,52	100,34	30,00	1140,00	413,79
4,35	106,87	104,69	30,00	1170,00	413,79
4,35	111,22	109,04	30,00	1200,00	413,79
4,35	115,57	113,39	30,00	1230,00	413,79
4,35	119,92	117,74	30,00	1260,00	413,79
4,35	124,27	122,09	30,00	1290,00	413,79
4,35	128,62	126,44	30,00	1320,00	413,79

Anexo 7 Datos metereológicos de la estación del Instituto Tecnológico de Cartago (Fuente: IMN 2014)

Estación	ITCR-Cartago	No. 73123	Lat. 09°51'N	Long. 83°54O	Altitud 1395 msnm									
Elementos	Períodos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Annual
Lluvia (mm)	1998-2013	64,9	40,7	23,9	38,1	179,7	184,5	142,4	152,8	207,5	232,9	153,4	83,9	1504,7
Días Lluvia	1998-2013	17	13	13	13	22	24	23	23	25	24	23	21	241
Tem.Máx (°C)	1998-2013	21,8	22,7	23,5	24,5	25	24,7	23,9	24,5	25,1	24,4	22,8	22	23,7
Tem.Mín (°C)	1998-2013	13,4	13,4	13,8	14,8	16	15,9	15,7	15,6	15,6	15,8	15,2	14,2	15
Tem.Media (°C)	1998-2013	17,6	18,1	18,7	19,7	20,5	20,3	19,8	20,1	20,4	20,1	19	18,1	19,3
Humedad (%)	1998-2013	90	88	88	88	9	90	91	91	90	90	92	91	89,9
Viento (Km/h)	1998-2013	14,6	14,3	13,9	12,8	9,1	8,5	10,1	8,9	7,1	7,7	10,1	13	10,8
Dirección predominante del viento	1998-2013	Este/Sureste	1mm=1 litro de agua por m2		Días con lluvia >= 0,1 mm									

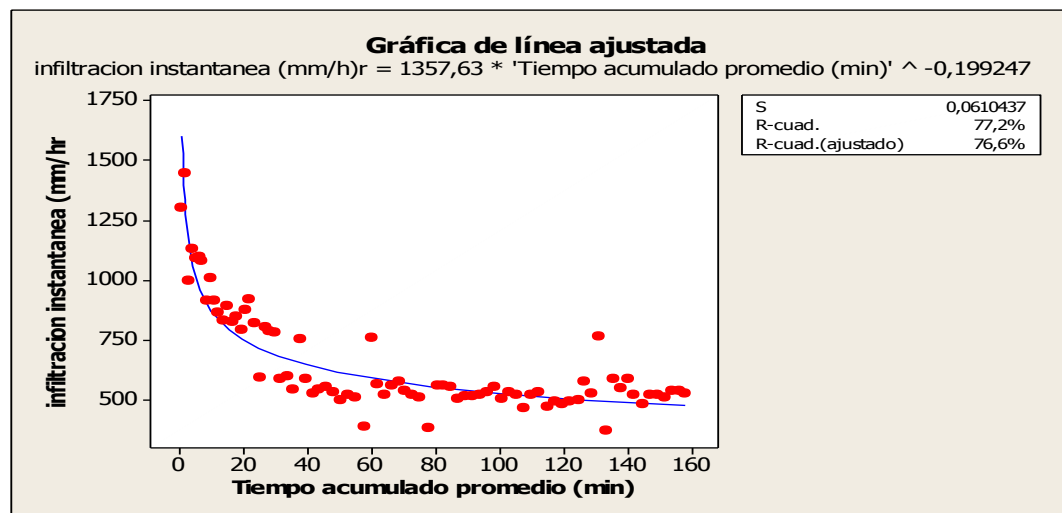
**Anexo 8 Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°3 para el suelo del terreno
A₂**

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
0,92	20,00	0,46	20,00	1304,35	1304,35
0,83	20,00	1,34	40,00	1445,78	1445,78
1,20	20,00	2,35	60,00	1000,00	1000,00
1,06	20,00	3,48	80,00	1132,08	1132,08
1,10	20,00	4,56	100,00	1090,91	1090,91
1,09	20,00	5,66	120,00	1100,92	1100,92
1,11	20,00	6,76	140,00	1081,08	1081,08
1,31	20,00	7,97	160,00	916,03	916,03
1,19	20,00	9,22	180,00	1008,40	1008,40
1,31	20,00	10,47	200,00	916,03	916,03
1,39	20,00	11,82	220,00	863,31	863,31
1,44	20,00	13,23	240,00	833,33	833,33
1,34	20,00	14,62	260,00	895,52	895,52
1,45	20,00	16,02	280,00	827,59	827,59
1,41	20,00	17,45	300,00	851,06	851,06
1,51	20,00	18,91	320,00	794,70	794,70
1,37	20,00	20,35	340,00	875,91	875,91
1,30	20,00	21,68	360,00	923,08	923,08
1,46	20,00	23,06	380,00	821,92	821,92
2,02	20,00	24,80	400,00	594,06	594,06
1,49	20,00	26,56	420,00	805,37	805,37
1,52	20,00	28,06	440,00	789,47	789,47
1,53	20,00	29,59	460,00	784,31	784,31
2,04	20,00	31,37	480,00	588,24	588,24
2,00	20,00	33,39	500,00	600,00	600,00
2,20	20,00	35,49	520,00	545,45	545,45
1,59	20,00	37,39	540,00	754,72	754,72
2,03	20,00	39,20	560,00	591,13	591,13
2,27	20,00	41,35	580,00	528,63	528,63
2,20	20,00	43,58	600,00	545,45	545,45
2,16	20,00	45,76	620,00	555,56	555,56
2,24	20,00	47,96	640,00	535,71	535,71

**Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°3 para el suelo del terreno A₂
(continuación)**

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
3,08	20,00	57,67	720,00	389,61	389,61
1,58	20,00	60,00	740,00	759,49	759,49
2,11	20,00	61,85	760,00	568,72	568,72
2,29	20,00	64,05	780,00	524,02	524,02
2,15	20,00	66,27	800,00	558,14	558,14
2,07	20,00	68,38	820,00	579,71	579,71
2,22	20,00	70,52	840,00	540,54	540,54
2,29	20,00	72,78	860,00	524,02	524,02
2,34	20,00	75,09	880,00	512,82	512,82
3,15	20,00	77,84	900,00	380,95	380,95
2,15	20,00	80,49	920,00	558,14	558,14
2,13	20,00	82,63	940,00	563,38	563,38
2,17	20,00	84,78	960,00	553,00	553,00
2,37	20,00	87,05	980,00	506,33	506,33
2,32	20,00	89,39	1000,00	517,24	517,24
2,33	20,00	91,72	1020,00	515,02	515,02
2,31	20,00	94,04	1040,00	519,48	519,48
2,25	20,00	96,32	1060,00	533,33	533,33
2,17	20,00	98,53	1080,00	553,00	553,00
2,38	20,00	100,80	1100,00	504,20	504,20
2,24	20,00	103,11	1120,00	535,71	535,71
2,31	20,00	105,39	1140,00	519,48	519,48
2,58	20,00	107,83	1160,00	465,12	465,12
2,31	20,00	110,28	1180,00	519,48	519,48
2,24	20,00	112,55	1200,00	535,71	535,71
2,55	20,00	114,95	1220,00	470,59	470,59
2,43	20,00	117,44	1240,00	493,83	493,83
2,49	20,00	119,90	1260,00	481,93	481,93
2,43	20,00	122,36	1280,00	493,83	493,83
2,39	20,00	124,77	1300,00	502,09	502,09
2,08	20,00	127,00	1320,00	576,92	576,92

Intervalo tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo promedio acumulado (min)	Lámina infiltrada(mm)	Lámina acumulada(mm)	Ii (mm/h)
1,57	20,00	131,11	1360,00	764,33	764,33
3,21	20,00	133,50	1380,00	373,83	373,83
2,04	20,00	136,12	1400,00	588,24	588,24
2,18	20,00	138,23	1420,00	550,46	550,46
2,04	20,00	140,34	1440,00	588,24	588,24
2,30	20,00	142,51	1460,00	521,74	521,74
2,47	20,00	144,90	1480,00	485,83	485,83
2,30	20,00	147,28	1500,00	521,74	521,74
2,29	20,00	149,58	1520,00	524,02	524,02
2,35	20,00	151,90	1540,00	510,64	510,64
2,22	20,00	154,18	1560,00	540,54	540,54
2,22	20,00	156,40	1580,00	540,54	540,54
2,27	20,00	158,65	1600,00	528,63	528,63



Curva potencial de la prueba de infiltración y ecuación de infiltración instantánea, proveniente de los valores del cuadro del Anexo 8

Anexo 9 Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°4, para el terreno 2

Tiempo parcial (min)	Lámina Infiltrada (mm)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo acumulado promedio (min)	Infiltración instantánea (mm/h)
0,45	10	0,45	0,23	1333,33
0,65	10	1,10	0,78	923,08
0,48	10	1,58	1,34	1241,38
0,58	10	2,17	1,88	1028,57
0,58	10	2,75	2,46	1028,57
0,70	10	3,45	3,10	857,14
0,70	10	4,15	3,80	857,14
0,73	10	4,88	4,52	818,18
0,72	10	5,60	5,24	837,21
0,70	10	6,30	5,95	857,14
0,65	10	6,95	6,63	923,08
0,82	10	7,77	7,36	734,69
0,65	10	8,42	8,09	923,08
0,63	10	9,05	8,73	947,37
0,77	10	9,82	9,43	782,61
0,78	10	10,60	10,21	765,96
0,80	10	11,40	11,00	750,00
0,78	10	12,18	11,79	765,96
0,83	10	13,02	12,60	720,00
0,77	10	13,78	13,40	782,61
0,73	10	14,52	14,15	818,18
0,85	10	15,37	14,94	705,88
0,83	10	16,20	15,78	720,00
0,87	10	17,07	16,63	692,31
0,87	10	17,93	17,50	692,31
0,88	10	18,82	18,38	679,25
0,93	10	19,75	19,28	642,86
0,78	10	20,53	20,14	765,96
0,83	10	21,37	20,95	720,00
1,03	10	22,40	21,88	580,65
0,80	10	23,20	22,80	750,00
0,83	10	24,03	23,62	720,00
0,95	10	24,98	24,51	631,58

Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°4 para el suelo del terreno A₂ (continuación)				
Tiempo parcial (min)	Lámina Infiltrada (mm)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo acumulado promedio (min)	Infiltración instantánea (mm/h)
0,90	10	28,75	28,30	666,67
0,75	10	29,50	29,13	800,00
0,97	10	30,47	29,98	620,69
0,93	10	31,40	30,93	642,86
0,95	10	32,35	31,88	631,58
0,90	10	33,25	32,80	666,67
0,97	10	34,22	33,73	620,69
0,88	10	35,10	34,66	679,25
0,80	10	35,90	35,50	750,00
0,92	10	36,82	36,36	654,55
0,97	10	37,78	37,30	620,69
0,92	10	38,70	38,24	654,55
0,95	10	39,65	39,18	631,58
0,93	10	40,58	40,12	642,86
0,92	10	41,50	41,04	654,55
0,92	10	42,42	41,96	654,55
0,92	10	43,33	42,88	654,55
0,92	10	44,25	43,79	654,55
0,93	10	45,18	44,72	642,86
0,93	10	46,12	45,65	642,86
0,97	10	47,08	46,60	620,69
0,98	10	48,07	47,58	610,17
0,92	10	48,98	48,53	654,55
0,97	10	49,95	49,47	620,69
0,93	10	50,88	50,42	642,86
0,93	10	51,82	51,35	642,86
0,97	10	52,78	52,30	620,69
1,05	10	53,83	53,31	571,43
1,10	10	54,93	54,38	545,45
1,12	10	56,05	55,49	537,31
1,07	10	57,12	56,58	562,50
1,07	10	58,18	57,65	562,50
1,08	10	59,27	58,73	553,85
1,07	10	60,33	59,80	562,50
1,07	10	61,40	60,87	562,50

Resultados obtenidos de la prueba de infiltración N°4 para el suelo del terreno A₂ (continuación)				
Tiempo parcial (min)	Lámina Infiltrada (mm)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo acumulado promedio (min)	Infiltración instantánea (mm/h)
1,07	10	63,60	63,07	562,50
1,07	10	65,73	65,20	562,50
1,08	10	66,82	66,28	553,85
1,07	10	67,88	67,35	562,50
1,13	10	69,02	68,45	529,41
1,07	10	70,08	69,55	562,50
1,08	10	71,17	70,63	553,85
1,08	10	72,25	71,71	553,85
1,07	10	73,32	72,78	562,50
1,08	10	74,40	73,86	553,85
1,08	10	75,48	74,94	553,85
1,13	10	76,62	76,05	529,41
1,13	10	77,75	77,18	529,41
1,15	10	78,90	78,33	521,74
1,13	10	80,03	79,47	529,41
1,13	10	81,17	80,60	529,41
1,12	10	82,28	81,73	537,31
1,17	10	83,45	82,87	514,29
1,17	10	84,62	84,03	514,29
1,15	10	85,77	85,19	521,74
1,18	10	86,95	86,36	507,04
1,17	10	88,12	87,53	514,29
1,20	10	89,32	88,72	500,00
1,08	10	90,40	89,86	553,85
1,07	10	91,47	90,93	562,50
1,13	10	92,60	92,03	529,41
1,17	10	93,77	93,18	514,29
1,18	10	94,95	94,36	507,04
1,17	10	96,12	95,53	514,29
1,17	10	97,28	96,70	514,29
1,20	10	98,48	97,88	500,00
1,22	10	99,70	99,09	493,15
1,23	10	104,42	103,80	486,49
1,23	10	105,65	105,03	486,49
1,23	10	103,18	102,57	486,49

Anexo 10 Ejemplo de riego a los surcos por tubería con compuertas



Anexo 11 Cortes, rellenos y cotas del proyecto del área de riego del terreno A₁ (O-E 2%, N-S 0,5%)

Nomenclatura	A-1	B-1	C-1	D-1	E-1
Cota primitiva	505,8245	504,2804	504,2253	503,2253	501,9996
Cota del proyecto	502,8948	502,6088	502,3228	502,0368	501,7508
Corte (-) / relleno (+)	-2,9297	-1,6716	-1,9025	-1,1885	-0,2488
Nomenclatura	A-2	B-2	C-2	D-2	E-2
Cota primitiva	504,3575	502,9724	502,6157	502,1295	501,4557
Cota del proyecto	502,8233	502,5373	502,2513	501,9653	501,6793
Corte (-) / relleno (+)	-1,5342	-0,4351	-0,3644	-0,1642	0,2236
Nomenclatura	A-3	B-3	C-3	D-3	E-3
Cota primitiva	503,1361	502,1603	501,8505	501,4867	500,9523
Cota del proyecto	502,7518	502,4658	502,1798	501,8938	501,6078
Corte (-) / relleno (+)	-0,3843	0,3055	0,3293	0,4071	0,6555
Nomenclatura	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4
Cota primitiva	502,1855	501,6423	501,3905	501,1094	500,5724
Cota del proyecto	502,6803	502,3943	502,1083	501,8223	501,5363
Corte (-) / relleno (+)	0,4948	0,752	0,7178	0,7129	0,9639
Nomenclatura	A-5	B-5	C-5	D-5	E-5
Cota primitiva	501,5225	501,3353	501,1153	500,8707	500,2055
Cota del proyecto	502,6088	502,3228	502,0368	501,7508	501,4648
Corte (-) / relleno (+)	1,0863	0,9875	0,9215	0,8801	1,2593